

ANÁLISIS DEL IMPACTO GENERADO POR LA SELECCIÓN DE CORRELACIONES  
PARA CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE  
PAVIMENTO FLEXIBLES.

LUIS FELIPE CUEVA LOZANO  
LAURA LUCIA EUSSE CACERES



UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
2017

ANÁLISIS DEL IMPACTO GENERADO POR LA SELECCIÓN DE CORRELACIONES  
PARA CÁLCULO DEL MÓDULO RESILIENTE EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE  
PAVIMENTO FLEXIBLES.

LUIS FELIPE CUEVA LOZANO  
LAURA LUCIA EUSSE CÁCERES

REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

TUTOR  
ING. ABRAHAM CASTAÑEDA

CO-TUTOR  
ING. IVAN SERRANO

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BARRANQUILLA  
2017

Nota de aceptación

---

**Nota**

---

Asesor

---

Asesor

---

Jurado 1

---

Jurado 2

### **Agradecimientos**

Primero gracias a Dios por permitirme y ayudarme a estudiar esta hermosa carrera.

Gracias a mis padres Oswaldo Cueva y Shirley Lozano, a mis hermanos Carlos y Oswaldo, a mi tío Edward Lozano y mi tía Joyce Lozano, a mi abuelo Carlos Lozano por su apoyo incondicional durante el transcurso de toda mi vida incluyendo la vida universitaria.

Gracias a mi mentor Abraham Castañeda por compartir sus conocimientos y motivarme a seguir aprendiendo.

Gracias a mi compañera, amiga y futura colega Laura Eusse por su paciencia, compromiso y ayuda durante la realización de este proyecto y mis días de vida universitaria.

Gracias a mis Cristina y Daniela por ser amigas incondicionales siendo gran apoyo durante los momentos difíciles.

***Luis Cueva Lozano***

### **Agradecimientos**

Primeramente, gracias a Dios por darme la fuerza y perseverancia para culminar la etapa más importante de mi vida.

A mis padres por darme la oportunidad y el apoyo necesario para este fin.

A mi compañero y amigo Luis por su dedicación, tiempo y entrega para este trabajo de grado.

A nuestro tutor el Ing. Abraham Castañeda por su confianza y tiempo invertido para lograr culminar este trabajo.

Y todas las personas que de alguna u otra manera hicieron que esto fuera posible.

***Laura Eusse***

### **Resumen**

El presente proyecto de grado evalúa el resultado de un parámetro como lo es el módulo resiliente del suelo de a través de una correlación, la cual fue desarrollada a través de un estudio empírico, y como el valor de éste importante parámetro influye en el diseño final de un pavimento. A través de la metodología ASSHTO 93 se realizará un diseño de pavimento flexible haciendo uso de cuatro correlaciones para determinar la variable anteriormente nombrada, teniendo como objetivo realizar recomendaciones basadas en la comparación y análisis de los resultados. Todo esto con el fin de hacer una adecuada selección de la correlación teniendo el CBR (California bearing ratio) como punto de partida para obtener un diseño final óptimo. Para la realización del análisis comparativo entre las correlaciones escogidas para el presente trabajo de grado, se generarán diversas modelaciones de estructuras de pavimentos flexibles con la finalidad de resaltar y analizar directamente el impacto de cada una de las correlaciones realizando una variación en el CBR de diseño, además se realizará un diseño final real en forma de un ejemplo práctico que demuestre de manera más clara, didáctica y completa el impacto de las correlaciones para la determinación de su capacidad estructural.

*Palabras claves: Pavimento flexible, CBR, correlaciones, diseño, variable, resiliente.*

### **Abstract**

The present degree project evaluates the result of a parameter such as the resilient soil module through a correlation, which was developed through an empirical study, and how the value of this was an important impact on the final design of a pavement. By the ASSHTO 93 Methodology, a flexible pavement design was made using four correlations to determine the above named variable, with the aim of updating the recommendations compared to the results. All this in order to make an adequate selection of the correlation taking into account the coefficient of friction of California (CBR) as a starting point to obtain an optimal final design. For the accomplishment of the comparative analysis between the correlations chosen for the present work of degree, diverse forms of structures of flexible pavements can be found with the purpose of selecting and analyzing directly the impact of each one of the correlations that realize a variation in the CBR. In addition, a real final design was made as a practical example that demonstrates in a clearer, more didactic and complete way the impact of the correlations for its design.

*Keywords: Flexible pavement, CBR, correlations, design, variable, resilient.*

## Contenido

<b>1.</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>12</b>
<b>2.</b>	<b>Formulación del problema .....</b>	<b>14</b>
<b>3.</b>	<b>Justificación .....</b>	<b>15</b>
<b>4.</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>16</b>
4.1.	Objetivo general .....	16
4.2.	Objetivos específicos.....	16
<b>5.</b>	<b>Delimitaciones.....</b>	<b>17</b>
5.1.	Delimitación espacial.....	17
5.2.	Delimitación Temporal.....	17
5.3.	Delimitación de Contenido .....	17
5.4.	Delimitación de la información .....	17
<b>6.</b>	<b>Limitaciones.....</b>	<b>19</b>
<b>7.</b>	<b>Instrumentos de recolección de información .....</b>	<b>20</b>
<b>8.</b>	<b>Marco de referencia.....</b>	<b>22</b>
8.1.	Antecedentes .....	22
8.2.	Metodologías de estabilización de Subrasante.....	23
8.2.1	Mejoramientos de subrasante con Cal. ....	24
8.2.2	Mejoramiento de subrasantes con cenizas volantes.....	25
<b>9.</b>	<b>Marco Conceptual .....</b>	<b>27</b>
9.1.	Pavimento .....	27
9.1.1	Características de los pavimentos.....	27
9.1.2	Clasificación de los pavimentos .....	28
	De acuerdo al tipo de material escogido para la capa de rodadura de una vía, se variará el tipo de estructura de pavimento las cuales se describirán a continuación:.....	28
9.1.2.1	Pavimento rígido.....	28
9.1.2.2	Pavimento flexible.....	29
9.1.2.3	Pavimento articulado.....	30
9.1.3	Capas que conforman la estructura de un pavimento. ....	30
9.2	El Asfalto .....	31
9.2.1	Composición química del asfalto .....	31
9.2.1.1.	Asfaltenos.....	32
9.2.1.2	Maltenos.....	32
9.3	Tipos de pavimentos flexibles.....	32



9.3.1	Cemento asphaltico .....	33
9.3.2	Asfaltos líquidos .....	33
9.3.3	Emulsiones Asfálticas .....	33
9.4	Diseño pavimentos flexibles.....	34
9.5	Metodología Ivanov .....	38
9.6.	Módulo resiliente. ....	39
10.	Diseño metodológico .....	42
10.1	Desarrollo experimental .....	42
10.2	Diseño de pavimento flexible a través de metodología ASSHTO 93. ....	42
10.3	. Resumen de datos recolectados. ....	49
11	Análisis de resultados. ....	52
11.1	Comparativa de resultados para módulos resiliente .....	52
11.2	Comparativa resultados espesores de capas estabilizantes.....	55
11.3	Comparativo número de ejes equivalentes soportados para diseños con capas estabilizantes.....	57
11.4	Comparativa número de ejes equivalentes soportados para diseños sin capas estabilizantes 61	
11.5	Comparativa de módulos equivalentes .....	63
11.6	Ejemplo Práctico. ....	64
11.6.1	Determinación tramos homogéneos:.....	66
11.6.2	Parámetros estadísticos del método.....	66
11.6.3	Resultados obtenidos.....	71
11.6.3.	Análisis del ejemplo practico.....	73
12.	Conclusiones y recomendaciones .....	75
13.	Bibliografía. ....	78

### Lista de tablas

<i>Tabla 1. Niveles recomendados confiabilidad.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabla 2. Relación entre Zr y la confiabilidad en una distribución normal.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 3. Coeficientes de drenaje mi recomendados para bases y subbases granulares .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabla 4. Módulos Subrasantes en kg/cm<sup>2</sup> .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 5. Espesor de la Capa estabilizante en cm .....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 6. Nro. de ejes equivalentes de 8,2 Soportado por la estructura.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 7. Comparativa Porcentual Módulo Resiliente .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 8. Comparativa porcentual Espesores de capas Estabilizantes. ....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 9. Comparativa porcentual Numero de ejes equivalentes de 8,2 ton soportados por las estructuras con estabilización. ....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 10. Numero de ejes equivalentes de 8,2 ton soportados por las estructuras sin estabilización .....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 11. Modulo equivalente en kg/cm<sup>2</sup> .....</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 12. CBR recolectados .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 13. Método de las diferencias acumuladas.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 14. Tramos Homogéneos .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabla 15. Primer tramo homogéneo.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 16. Segundo tramo homogéneo.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 17. Tramo homogéneo nro. 3.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 18. Resultados ejes equivalente tramo 1.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 19. Resultados Tramo 2.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 20. Resultados Tramo 3.....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 21. Comparativa Porcentual ejes equivalente Tramo 1 .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 22. Comparativo Porcentual ejes equivalente tramo 2 .....</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 23. Comparativa Porcentual ejes equivalente Tramo 3 .....</i>	<i>73</i>

### Lista de figuras

Figura 1. <i>Estructura de típica pavimento rígido</i> .....	28
Figura 2. <i>Estructura típica pavimento flexible</i> .....	29
Figura 3. <i>Estructura típica pavimento articulado</i> .....	30
Figura 4. <i>Representación gráfica de la acumulación de deformaciones residuales</i> .....	41
Figura 5. <i>Vista general de la Macro de Excel utilizada</i> .....	43
Figura 6. Vista de datos de entrada macro de Excel. ....	44
Figura 7. Vista lista selección de correlaciones. ....	45
Figura 8. Vista datos de entrada metodología AASHTO 93.....	46
Figura 9. Vista Tabla resumen de espesores y sus características. ....	47
Figura 10. <i>Vista tabla de resultados</i> .....	47
Figura 11. Vista hoja de comparativa entre diseños. ....	48
Figura 12. Vista hoja de resumen de resultados.....	49
Figura 13. Gráfica Módulo resiliente vs CBR .....	53
Figura 14. Gráfica Espesores estabilizantes vs CBR .....	56
Figura 15. Gráfica Nro. ejes equivalentes vs CBR, con capa estabilizante. ....	58
Figura 16. Gráfica Nro. ejes equivalentes vs CBR, sin capa estabilizante.....	61
Figura 17. : Localización de la vía a intervenir. ....	65
Figura 18. Gráfico para determinar tramos homogéneos.....	69

## 1. Introducción

En la actualidad el área de pavimentos en Colombia ha tenido un alto crecimiento debido a la aceleración de la economía y el crecimiento de las necesidades de infraestructura vial del país, motivo por el cual se hace necesario que los diseños de pavimentos cumplan con todas las normas y estándares requeridos de acuerdo a las condiciones del entorno y las necesidades del mismo. En Colombia se diseñan tres tipos de pavimento, pavimento rígido, flexible y articulado, siendo los dos primeros generalmente diseñados bajo la metodología ASSHTO 93, los cuales difieren en las características de los materiales utilizados en su capa de rodadura y capas que conforman su estructura de pavimento. En nuestro país se diseñan los pavimentos de acuerdo a diversas metodologías, siendo la guía metodológica ASSHTO 93 la más empleada. Este método fue fruto de una serie de pistas de ensayo que fueron construidas a partir del año 1956 y cuyo objetivo fue obtener datos confiables específicos del comportamiento de pavimentos rígidos y flexibles bajo una serie de cargas dinámicas impartidas por el tránsito junto con factores atmosféricos. Una vez finalizado el ensayo y procesados los datos entre 1958 y 1960, se desarrolló la primera guía bajo estudio experimental para el diseño de pavimentos bajo el nombre de “Interim Guide For Design of Pavement Structures”, base de la cual surgió con algunas modificaciones la primera guía ASSHTO publicada en 1986. Luego con otras modificaciones significativas volvió a ser publicada en 1993 bajo el nombre de ASSHTO 93. En el caso del pavimento flexible, el módulo resiliente es el parámetro que indica el estado en el que se encuentra la subrasante o terreno natural, caracterizando su resistencia a cargas dinámicas generadas por el tránsito, citando al Ing. Abraham Castañeda el módulo resiliente:” Es *una caracterización de la resistencia del suelo teniendo en cuenta las deformaciones permanentes residuales generadas por las cargas dinámicas que produce el paso vehicular*”. El módulo

resiliente del suelo se obtiene a través de un ensayo de laboratorio llamado triaxial dinámico el cual se ha logrado debido desarrollo tecnológico que se ha presentado a lo largo de los años en el campo de la ingeniería de pavimentos, pero en nuestro país no es factible realizarlo debido a su alto costo. Para obtener el valor del módulo resiliente se emplea una correlación, la cual es empírica y está en función del CBR, lo que quiere decir, que al comparar resultados se obtendrán valores diferentes y alejados entre sí para un mismo CBR empleando distintas correlaciones, por tanto, si se comparara el mismo diseño con las mismas características exceptuando el módulo resiliente, es posible que el diseño difiera en los diferentes espesores de la estructura, lo que conlleva a que aunque una tengan la misma modelación de capas su capacidad estructural difiera, es decir, la resistencia del número de ejes equivalentes será distinto, como consecuencia de esto, se generara una incertidumbre en el diseño por lo que la estructura de pavimento puede quedar o no sobredimensionada. La finalidad de este proyecto es identificar que correlación de las que serán presentadas a lo largo del trabajo brinde un diseño más confiable y que permita a la estructura cumplir con la vida útil para la cual fue diseñada.

## **2. Formulación del problema**

¿Cómo obtener un diseño óptimo de estructuras de pavimento flexible a partir del módulo resiliente de sus capas? La resistencia de la subrasante y de las capas granulares de base y subbase está representada por el Módulo resiliente, el cual es una de las variables contempladas en los métodos de diseño de pavimentos como el AASHTO 93. El ensayo triaxial dinámico se utiliza para determinar el Módulo Resiliente, pero debido a la poca disponibilidad de este equipo y lo costoso que es en Colombia, se ha optado por la implementación de correlaciones basadas en el CBR, para lograr un valor estimado. Sin embargo, no se tiene claridad de la incidencia que ocasiona la elección de una correlación en el diseño final de la estructura del pavimento, las cuales fueron determinadas por estudios empíricos.

### **3. Justificación**

Desde el principio de la civilización y su decisión de asentarse en pequeños grupos hasta conformar las primeras ciudades se vio la necesidad de trazar caminos. Estos han ido variando en material, metodología y métodos de construcción debido a la necesidad de la misma población. Es por esto, que el área de pavimentos se ha vuelto un área muy importante de la ingeniería civil, la cual cuenta con sus respectivas metodologías y parámetros de diseño dependiendo a las características del entorno que rodean a este. El diseño de una estructura de pavimento tiene como finalidad la durabilidad y funcionalidad del mismo. Por lo cual es importante que los parámetros que involucran el diseño sean escogidos con criterio y profesionalismo. El módulo resiliente influirá directamente en el espesor de la capa de rodadura del pavimento, haciendo este una decisión importante para la durabilidad y costo del mismo. Al ser entonces este parámetro obtenido de una manera empírica, se debe hacer entonces una evaluación minuciosa de cómo afectaría el diseño y que opción de correlación es la más adecuada para el diseño final.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo entre los impactos generados por las diferentes correlaciones para el cálculo del módulo resiliente, todo esto con el fin de generar un criterio de selección más acertado y estandarizado en los diseños de pavimento flexible.

### **4.2. Objetivos específicos**

- Analizar los resultados obtenidos de la comparación de los diseños de pavimentos flexibles para resaltar la incidencia del módulo resiliente.
- Diseñar cuatro estructuras de pavimento realizando la variación de las cuatro correlaciones escogidas en las estructuras de pavimento para así analizar cómo influyen en el diseño final.
- Realizar un análisis de sensibilidad entre los resultados obtenidos en los diseños al variar la correlación para el módulo resiliente.



## **5. Delimitaciones**

### **5.1. Delimitación espacial**

El presente trabajo está presentado como guía de uso desde un enfoque netamente académico que puede ser consultada a nivel nacional.

### **5.2. Delimitación Temporal**

Espacio de tiempo dedicado a la realización del presente trabajo de grado, el cual tuvo una duración de 10(diez) meses a partir de la presentación del anteproyecto y finalizando con la entrega y sustentación del trabajo de grado.

### **5.3. Delimitación de Contenido**

Corresponde a la temática tratada a lo largo de este documento la cual es en el área de diseño de pavimentos, más específicamente el diseño de pavimentos flexibles con la metodología AASHTO 93 y cómo influye el valor de un parámetro hallado a través de una metodología empírica en el diseño final de un pavimento.

### **5.4. Delimitación de la información**

Se tendrá en cuenta la información plasmada en distintos libros que hacen referencia al tema tratado en esta investigación, la cual es suficiente para desarrollar el tema planteado; además a esto se tendrán en cuenta las distintas fuentes de información que se encuentran en la web en lo que respecta a los métodos y metodologías de diseño establecidas en la literatura.

## **6. Limitaciones**

En el presente trabajo, solo se analizarán los resultados de cuatro correlaciones para estudiar el módulo resiliente, debido a que hay una gran cantidad de estas para la estimación del módulo. Se recomendaría para próximos estudios incluir más correlaciones y estudiar si estas podrían tener una similitud en su estructura o coeficientes y analizar bajo que parámetros fueron estudiadas y plantear la posibilidad que puedan estandarizarse para tener un valor de modulo más seguro y cercano al real.

## 7. Instrumentos de recolección de información

La recolección de información necesaria para la realización de este proyecto de grado, se utilizaron diversos recursos físicos y digitales de terceros, del primero se destaca la información provista por la literatura de especialistas en el área del diseño de pavimento, y la guía AASHTO 93, por parte de la segunda se resaltan artículos científicos resultados de investigaciones acerca del módulo resiliente en las estructuras de pavimentos y diapositivas de especialistas en el campo, además fuentes de información propias que están constituidas por la modelación de las estructuras de pavimento por medio de una macro de excel elaborada por los estudiantes que hacen parte de este proyecto basada en una hoja de cálculo provista por el tutor. Toda la información recolectada se centra en estructuras de pavimentos, haciendo énfasis en pavimentos flexibles, sus componentes y especialmente la participación del módulo resiliente durante el proceso de diseño.

### Libros

- AASHTO guide for desing of pavement structures, AASHTO 1993
- Ingeniería de pavimentos para carreteras, segunda edición, Ing. Alfonso Montejó, 2002
- Pavimentos: Materiales, construcción y diseño, Ing. Hugo Rondón e Ing. Fredy Reyes, 2015

### Tesis

- “Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios AASHTO 1993 Y 2002”, Herrera Montealegre, M. (2014). Universidad de Piura – Perú

### Artículos:

- Módulo resiliente de suelos finogranulares. Vidal, J., & Osorio, R. (2012). Revista Universidad EAFIT.
- Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a la fatiga de mezclas asfálticas. (2013). Artículo de investigación. Universidad distrital de caldas.
- Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles. (2007). Revista. Universidad de Medellín.

## 8. Marco de referencia

### 8.1. Antecedentes

Autor 1

Rondon, H. Fernandez, W. Hernandez, J, desarrollaron a través de simulación computacional la influencia que tiene la subrasante a la fatiga de capas asfálticas de estructuras de pavimentos flexibles. Los métodos de diseño de pavimento utilizados en Colombia usan el módulo resiliente para caracterizar la subrasante. El empleo de cualquier correlación puede hacer variar el módulo de resiliente según Rondón et al, entre 4,6 y 48,5 veces haciendo que quede un nivel de la incertidumbre a la hora de realizar el diseño debido a que la estructura puede estar sub o sobredimensionada.

RONDÓN QUINTANA, Hugo; FERNÁNDEZ GÓMEZ, Wilmar; HERNÁNDEZ NOGUERA, Jesús. Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares *sobre la vida a la fatiga de mezclas asfálticas*. 2013. Artículo de investigación. Universidad distrital de Caldas

Autor 2

Se basaron en estudios desarrollados para medir la respuesta resiliente de los materiales granulares y discutieron los factores que influyen en este. Al final del estudio evolucionaron algunas ecuaciones matemáticas desarrolladas a partir de resultados de estudios teóricos experimentales para evaluar el comportamiento de los materiales empleados en las capas base y

subbase. Según Rondón, se puede tener una mejor predicción de la resiliencia del material cuando se utilizan las ecuaciones elásticas no lineales que tengan en cuenta el comportamiento anisótropo de materiales granulares.

RONDÓN QUINTANA, Hugo; REYES LIZCANO, F. *Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles*. 2007. Revista. Universidad de Medellín.

Autor 3

Se debe tener en cuenta el cambio en las condiciones ambientales al momento de realizar el diseño del pavimento, debido a que estas podrán cambiar las propiedades de los materiales tenidos en cuenta y así mismo afectar el valor del módulo resiliente. Pérez, N y Anguas, P, compararon valores de módulos en diferentes condiciones (húmedas y secas), en lo cual evidenciaron el incremento o disminución en los valores de los módulos de acuerdo con la compactación alcanzada. Finalmente concluyeron que el módulo puede aumentarse el doble bajo condiciones normales de agua, y si, por el contrario, esta última aumenta, entonces el valor de resiliencia disminuye en un 50% respecto al contenido óptimo.

GARCÍA PÉREZ, Natalia; ANGUAS GARNICA, Paul. Módulo de resiliencia: Distribución de sus valores en el espacio de compactación y comportamiento en trayectoria de humedecimiento y secado. 2001.

## **8.2. Metodologías de estabilización de Subrasante.**

### 8.2.1 Mejoramientos de subrasante con Cal.

Autor 1

Por lo general, los suelos que tienen CBR menores al 5% son suelos altamente plásticos, con altos valores de límite líquido y humedad relativa. Cuando encontramos suelos con estas características es necesario mejorarlas para poder usarlas como subrasante de pavimentos, Castillo, B (2016) presenta una alternativa para el mejoramiento de subrasantes a través de la cal viva, haciendo pruebas con porcentajes de 10, 20, 30 y 40 de dicho material respecto al peso seco. Obteniendo como resultado la disminución de las características iniciales y el aumento del CBR. El objetivo era realizar el mejoramiento de la subrasante con este material y determinar cómo las condiciones en sitio afectaban la misma. A través de las pruebas de laboratorio pudo determinar que:

- Al tratar este tipo de suelos con este material estabilizante se obtiene una reducción 3.12% de la humedad del suelo por cada porcentaje de cal agregado.
- Aumento de la densidad máxima seca a medida que se aumenta el porcentaje de cal.
- Reducción total del factor de expansión del suelo cuando el porcentaje de cal es igual a 20.
- Recomendación de utilización de cal de hasta máximo un 20%.

Fuente:

Castillo Parra, B. F. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos de Macas con valores de CBR menores al 5% y límites líquidos superiores al 100%, para utilizarlos como subrasantes en carreteras* (Master's thesis).

Autor 2



Elizante et al (2010) coinciden con el autor anterior, la mejor opción para la estabilización de suelos finos de media y alta plasticidad es la cal, debido que determinaron bajo ensayos el aumento de las condiciones de resistencia mecánica que experimentan estos suelos al ser mejoradas con dicho aditivo. A diferencia del autor anterior, empleo dos tipos de cales (cal de primera y cal de segunda) en la cual concluyo que la cal de primera mejora las condiciones respecto al ensayo de compresión inconfiada debido a la alta concentración de óxido de calcio y óxido de magnesio. El autor recomienda: “estudiar los efectos de estos dos tipos de la cal y su influencia en el valor del módulo resiliente de subrasante estabilizados para determinar el porcentaje óptimo de cal, el proceso de compactación o que otros factores influyen en el desempeño de los mismos. “. Además, recomienda el estudio de como las concentraciones los elementos que conforman la cal afectarían de alguna u otra manera las condiciones finales de la subrasante, así como también recomienda variar el sitio proveniente de la cal para ver cómo influye en los resultados.

Fuente

Elizondo Arrieta, F., Navas Carro, A., & Sibaja Obando, D. (2016). *Efecto de la cal en la estabilización de subrasantes*.

### **8.2.2 Mejoramiento de subrasantes con cenizas volantes.**

Pérez, R (2012, Perú) Plantea la evaluación y utilización de este tipo de residuos para mejoramientos de suelos arcillosos, ya sea para ser utilizados como subbase o subrasantes. Los componentes de estas cenizas reaccionan con los componentes del suelo disminuyendo el índice de expansión de arcillas y por ende aumentando su resistencia mecánica. El porcentaje que debe ser empleado para la estabilización debe ser mayor a 20, para que haya un cambio significativo en

las propiedades mecánicas iniciales del material. Se deben chequear los valores de plasticidad debido a que si es de alta plasticidad no es apta para uso como subrasante. Si se fusiona este material con cemento Portland en un 3%, el autor asegura que aumenta drásticamente las condiciones de resistencia desde 7.7% hasta en un 51%. Debido a la falta de recursos, el autor recomienda realizar estudios para el cálculo del módulo resiliente de arcillas y analizar como este valor varía antes y después de la estabilización.

Fuente

Pérez Collantes, R. D. C. (2012). *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada y/o sub base de pavimentos.*

## **9. Marco Conceptual**

Desde el principio de la civilización y su decisión de asentarse en pequeños grupos hasta conformar las primeras ciudades se vio la necesidad de trazar caminos. Estos han ido variando en material, metodología y métodos de construcción debido a la necesidad de la misma población. Es por esto, que el área de pavimentos se ha vuelto un área muy importante de la ingeniería civil, la cual cuenta con sus respectivas metodologías y parámetros de diseño dependiendo a las características del entorno que rodean a este.

A continuación, se mencionará conceptos teóricos que ayudaran a comprender este documento:

### **9.1. Pavimento**

Está conformado por una serie de capas de materiales con ciertas características específicas las cuales conforman una estructura. Ésta se construye de una manera tecnificada siguiendo ciertas especificaciones las cuales garantizarán su propósito el cual es soportar las cargas dinámicas impartidas por el tránsito en el periodo de tiempo para el cual fue diseñado.

#### **9.1.1 Características de los pavimentos**

- Debe cumplir con la resistencia a las cargas dinámicas impartidas por el tránsito
- Debe ser resistente a la intemperie
- Debe contar con una fricción adecuada para el evitar el deslizamiento y además resistente al desgaste producido por el rodamiento vehicular

- Debe ser durable
- Debe contar con un drenaje óptimo
- Debe ser económico
- Debe ofrecer seguridad al usuario

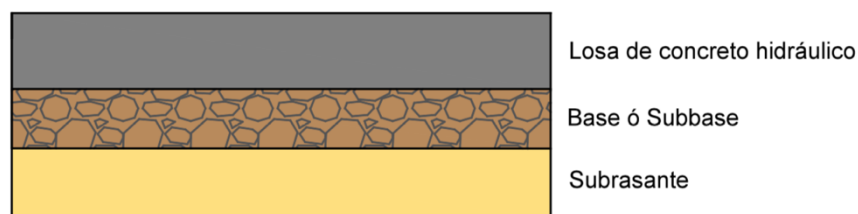
### 9.1.2 Clasificación de los pavimentos

De acuerdo al tipo de material escogido para la capa de rodadura de una vía, se variará el tipo de estructura de pavimento las cuales se describirán a continuación:

#### 9.1.2.1 Pavimento rígido

El pavimento rígido es aquel que tiene concreto hidráulico como material en su capa de rodadura. Este material tiene un alto módulo de elasticidad, lo que quiere decir que resiste en su mayoría los esfuerzos producidos por las cargas. Este tipo de pavimento tiene tres estructuras como se puede apreciar en la figura 1:

Figura 1.



*Nota: Estructura de típico pavimento rígido. Elaboración propia 2017.*

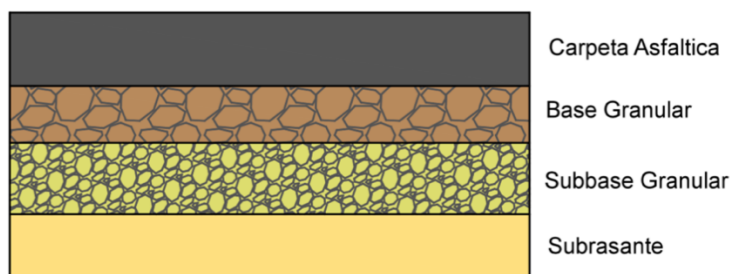
Este tipo de pavimento se diseña a través de la guía metodología ASSHTO 93, la cual indica el procedimiento de diseño teniendo en cuenta variables climáticas y del material, totalmente diferentes a la metodología de otros tipos de pavimentos.

#### 9.1.2.2 Pavimento flexible

El pavimento flexible es un tipo de pavimento que tiene como principal característica el origen bituminoso de la capa de rodadura del pavimento. Se le denomina flexible, porque este material posee propiedades visco-elásticas las cuales le ayudan a tener una performance dependiendo a las condiciones climático-ambientales en las que se encuentre las cuales no son objeto de esta investigación, pero si influyen en el diseño de este tipo de pavimentos, y las cuales hay que tener en cuenta dependiendo a la ubicación geográfica de cualquier diseño de este tipo de pavimentos.

El pavimento flexible actúa como un tipo de resorte absorbiendo la totalidad de las cargas dinámicas en cada una de las capas de su estructura, incluso, dejando que un porcentaje muy bajo de estas llegue a la subrasante.

Figura 2.

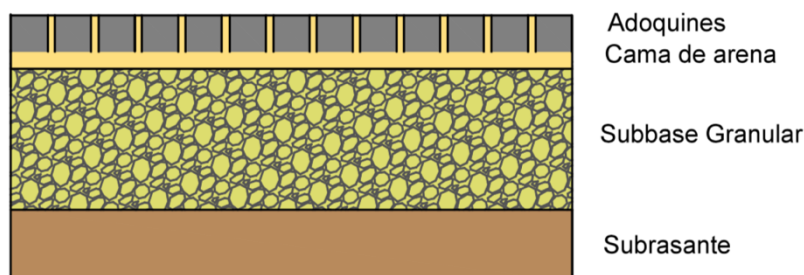


*Nota: Estructura típica pavimento flexible. Elaboración propia 2017.*

### 9.1.2.3 Pavimento articulado.

El pavimento articulado está compuesto principalmente por adoquines, que son pequeños elementos de cemento o arcilla, prefabricados, los cuales con un alto módulo de rigidez individualmente y los cuales son cimentados sobre una capa de arena. Pueden tener capas de base o estar cimentados sobre la subrasante, dependiendo de su calidad y características. Según el Ing. Higuera, “Transmiten esfuerzos al suelo de soporte mediante un mecanismo de disipación de tensiones”. El método para diseñar este tipo de pavimentos es el TRL desarrollado en tal el cual consiste en un algoritmo que indica según las características del suelo y demás parámetro los espesores que irán tomando las diferentes capas del pavimento articulado

Figura 3.



*Nota: Estructura típica pavimento articulado. Elaboración propia 2017.*

### 9.1.3 Capas que conforman la estructura de un pavimento.

**Capa de rodadura:** Capa superior, visible a la vista, la cual tiene como función servir como superficie de rodamiento para los vehículos. Además de también recibir las cargas y distribuir los esfuerzos horizontales producidos por estas, pasando de un valor positivo (de compresión) en la

superficie, a uno negativo (de tensión) en la fibra inferior, de manera que se evite el agrietamiento de la losa.

**Base:** Capa que proporciona resistencia y transmite a la subbase y base los esfuerzos horizontales generados por la capa superior (rodadura). Se encuentra por debajo de la capa de rodadura, La base granular debe ser un material seleccionado que cumpla con ciertos estándares de calidad, especificados en la norma INV-330 de 2012 para su uso en Colombia. La base también actúa como mecanismo de drenaje de las aguas que ingresan a la estructura de pavimento a través de la capa de rodadura.

**Subbase:** Esta capa de material es netamente económica, también puede contribuir como un elemento de transición entre la base y la subrasante. En algunos casos también puede aportar capacidad de soporte a la estructura de pavimento. INV 320 de 2012

**Subrasante:** Soporte sobre el que se cimienta la estructura del pavimento

## 9.2 El Asfalto

Es el material característico del diseño de pavimentos flexibles sobre el que se hablara en el presente trabajo de grado. El asfalto es un material que es obtenido al final del proceso de refinación de petróleo, presenta un color oscuro y tiene propiedades ligantes y aglutinantes. Su principal característica es el cambio de sus propiedades físicas con el aumento de la temperatura, variando así su consistencia y viscosidad.

### 9.2.1 Composición química del asfalto

El asfalto está constituido principalmente por hidrocarburos, la mayoría de estos hidrocarburos están presentes en el crudo del cual se produjo este asfalto, pero debido a la temperatura puede dar lugar para cambios en su estructura. El libro de Hugo León Arenas, cita como componentes del asfalto: Asfaltenos y Maltenos.

#### **9.2.1.1. Asfaltenos**

Están en la composición del asfalto en aproximadamente un 15 a 20%. Son responsables de la dureza y la resistencia del asfalto

#### **9.2.1.2 Maltenos**

Generalmente componen la mayor parte del asfalto. Se pueden separar en aceites y resinas, y son los responsables de la composición química y la calidad del asfalto. Funcionan como un agente estabilizador de asfaltenos, debido a que neutralizan la composición indeseable del asfalto como lo son los metales pesados y el azufre. Las resinas le proporcionan la característica aglutinante mientras que los aceites le aportan la consistencia necesaria para su manejabilidad y su capacidad para deformarse. Las propiedades físicas del asfalto dependerán de las proporciones en que se encuentren los compuestos anteriormente mencionados.

### **9.3 Tipos de pavimentos flexibles**

Materiales asfálticos utilizados para la pavimentación de carreteras:



### **9.3.1 Cemento asfaltico**

Es producto de la destilación del petróleo, generalmente se denominan con las letras AC y un número el cual indica su clasificación, la cual puede ser por penetración o viscosidad. El cemento asfaltico es el más utilizado para la realización de carreteras debido a sus propiedades impermeabilizantes y visco-elásticas. Además de ofrecer características de resistencia, durabilidad y flexibilidad pavimento. Este tipo de mezclas deben ser manejadas en caliente, y bajo las temperaturas para cada proceso de su vertimiento establecidas por el diseño para alcanzar la condición optima de resistencia y viscosidad.

### **9.3.2 Asfaltos líquidos**

Se presenta cuando se desea que la mezcla tenga una manejabilidad dada, adicionándole al cemento asfaltico un fluidificante volátil el cual puede ser: gasolina, kerosene o aceites, así mismo si se utilizan los anteriores, se obtendrán tres tipos de asfalticos líquidos, de curado rápido RC, de curado medio MC y de curado lento SC respectivamente. Una vez esté lista la mezcla, los fluidificantes volátiles se empiezan su proceso quedando como residuo un asfalto denominado como asfalto residual.

### **9.3.3 Emulsiones Asfálticas**

Es un sistema de dos fases que no se pueden mezclar. Se obtiene cuando se le adiciona al cemento asfáltico una cantidad dada de agua emulsificante, una vez la emulsión entra en contacto con los agregados, ocurre un desequilibrio eléctrico que la rompe, llevando a que las partículas de asfalto se adhieran a la superficie del agregado; luego el agua se evapora separándose de las partículas de asfalto. Existen diversos tipos de emulsificante que puede acelerar o retardar el efecto de la reacción que surge al entrar estas dos sustancias en contacto; depende del tiempo que dure esta reacción las emulsiones se pueden clasificar en emulsiones de rompimiento rápido, medio y lento.

#### 9.4 Diseño pavimentos flexibles.

El método AASHTO 93 para pavimentos flexibles tiene en cuenta una serie de características para el diseño: comportamiento del asfalto, tráfico que experimentara el tramo en consideración, materiales de construcción, condiciones ambientales, drenaje, confiabilidad, tiempo de diseño de la estructura y parámetros de diseño. A continuación, se presenta la ecuación fundamental del diseño para pavimento flexible según la guía metodología AASHTO 93:

$$\log W_{18} = (z_R)(S_o) + (9.36)(\log(SN + 1)) - 0.20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta ISP}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + (2.32)(\log M_r) - 8.07$$

Ecuación 1.- AASHTO 93

Donde las consideraciones de diseño son:

**$W_{18}$** : hace referencia al número de ejes equivalentes de 80KN que soportara la estructura a lo largo de su vida útil. Este dato se obtiene de un estudio de tránsito de la zona en la cual se realizará el diseño de pavimento.

**$\Delta PSI$** : Pérdida de serviciabilidad del pavimento. Se obtiene de la diferencia del índice de serviciabilidad inicial  $P_o$  y el índice de serviciabilidad final  $P_t$ . Este parámetro se puede definir como el grado de confort que perciben los usuarios del estado de la carretera en un determinado tiempo.

**$MR$** : Módulo resiliente de la subrasante

**$SN$** : Número estructural total del pavimento.

**$S_o$** : Desviación estándar total de la distribución normal de los errores asociado a la predicción del tránsito

**$Z_R$** : Parámetro estadístico que depende del valor de confiabilidad que se le asigna a una carretera a momento del diseño.

Tabla 1.

*Niveles recomendados confiabilidad*

<b>Clasificación funcional de la vía</b>	<b>Urbana</b>	<b>Rural</b>
Autopistas	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

*Nota: Tomado guía metodológica AASHTO 1993, página II-9.*

Tabla 2.

*Relación entre Zr y la confiabilidad en una distribución normal*

<b>Confiabilidad</b>	<b>Desviación Estándar</b>
50%	0,000
60%	-0,253
70%	-0,524
75%	-0,674
80%	-0,841
85%	-1,037
90%	-1,282
91%	-1,340
92%	-1,405
93%	-1,476
94%	-1,555
95%	-1,645
96%	-1,751
97%	-1,881
98%	-2,054
99%	-2,327
99,90%	-3,090
99,99%	-3,750

*Nota: Tomado guía metodológica AASHTO 1993, página I-62.*

**Coefficiente de drenaje:** Este parámetro establece la capacidad o calidad de drenaje de la estructura de pavimento teniendo en cuenta la calidad de tiempo que esta se puede encontrar con cantidades de agua que la lleven a un estado cercano a la saturación de manera que se considera la calidad de drenaje según el tiempo de esta manera: Excelente, si el agua se remueve entre 2 y 4 horas, Bueno, si le toma de 12 a 24, Normal, de 3 a 6 días, Malo, de 18 a 36 días Muy malo, más de 36 días. A continuación, se presentan los valores de coeficiente de drenajes recomendados por la metodología Aashto:

Tabla 3.

*Coefficientes de drenaje mi recomendados para bases y subbases granulares*

Calidad de drenaje	Porcentaje del tiempo en el que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 - 5 %	5 - 25%	> 25%
Excelente	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
Bueno	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.10	1.00
Normal	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.00 - 0.80	0.80
Malo	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
Muy malo	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

*Nota: Tomado guía metodología AASHTO 1993, página II-25..*

**Numero estructural:** A continuación, se explicará su cálculo según la información que brinda la metodología AASHTO 93

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3$$

Ecuación 2

Donde:

$a_1, a_2, a_3$  = Coeficiente estructural de capa asfáltica, base granular y subbase granular

$D_1, D_2, D_3$  = Espesor de capa asfáltica, base granular y subbase granular.

$m_2, m_3$  = Coeficiente de drenaje de capa base granular y subbase granular.

La finalidad de la ecuación anterior es determinar los espesores de las capas que componen el pavimento flexible, el primer paso que se debe seguir, es calcular el módulo, el cual dependerá de las condiciones climáticas de la zona en la que se diseñará el pavimento.

Para la carpeta de rodadura  $a_1$  :

$$a_1 = 0,7304 - 0,1271(\ln T \text{ } ^\circ\text{C aire})$$

Ecuación 3. AASHTO Guide for Pavement Structures - Numeral 2.3.5 Página II-17.

Para la subbase granular  $a_2$ :

$$a_2 = 0,249(\log_{10} E_{BG}) - 0,977$$

Ecuación 4. Coeficiente estructural - AASHTO93 (Bases Granulares)

Para la base granular  $a_3$ :

$$a_3 = 0,227(\log_{10} E_{SB}) - 0,839$$

Ecuación 5. Coeficiente Estructural - Subbase Granular. AASHTO 93.

Para relleno seleccionado  $a_4$ :

$$a_4 = 0,058CBR^{0.19}$$

Ecuación 6. Coeficiente Estructural – Material seleccionado AASHTO 93.

Obtenidos los coeficientes de capas respectivos, se procede a calcular el espesor de las capas, despejando cada término de la ecuación:

$$D_1 = \frac{SN_1}{a_1}, \quad D_2 = \frac{SN_2(Base\ granular)}{a_2}, \quad D_3 = \frac{SN_3(Subbase\ granular)}{a_3}$$

Ecuación 7. Espesor de capas – pavimentos flexibles. AASHTO 93.

## 9.5 Metodología Ivanov

Como bien se sabe las estructuras de pavimentos están apoyadas sobre el terreno natural, también llamado subrasante, esta es la plataforma de trabajo que permite la construcción y el buen funcionamiento de la estructura.

Las subrasantes no siempre tienen una capacidad portante que permita lo anteriormente nombrado, motivo por el cual, Según el manual Geosoft de Pavco (2012) 9ª edición: “La subrasante debe ser estabilizada para obtener una plataforma de compactación estable sobre terreno blanco que permita los trabajos de confirmación de la estructura sobre el terreno.”

Métodos de estabilización como el de Giroud y Han (2004) e Ivanov permiten determinar el espesor de material granular compactado la cual permitirá una plataforma de trabajo estable, siendo este último el método escogido para la elaboración de este proyecto de grado.

La metodología de Ivanov consiste en realizar un mejoramiento físico de la subrasante para mejorar su capacidad estructural, se determinará un espesor cuyo módulo junto con el de la subrasante genere un módulo equivalente característico de suelos que no necesitan estabilización. El espesor de la capa estabilizante está dado por la siguiente ecuación:

$$h_1 = \frac{2a}{n} \times \tan \left[ \frac{\left(1 - \frac{E_{sb}}{E_{equ}}\right)}{\frac{2}{\pi} \times \left(1 - \frac{1}{n^{3.5}}\right)} \right]$$

Ecuación 8. Ecuación Ivanov para estabilización de subrasantes. (Fuente: Ing. Abraham Castañeda 2016)

$$n = \frac{E_{sup}}{E_{inf}}$$

Donde:

$n$  : Módulo ponderado de las capas

$E_{inf}$ : Módulo de la capa inferior

$E_{sup}$ : Módulo de capa superior

$h_1$  : Espesor de la capa superior

$2a = 30.14$  cm

### 9.6. Módulo resiliente.

El módulo resiliente de un suelo no es más que su capacidad de absorber energía debido a las cargas dinámicas impuestas por el tránsito y liberarlas debido a sus propiedades elásticas,

teniendo así deformaciones que no se quedan en el rango plástico. Este parámetro por el cual se caracteriza a las subrasantes, se determina a través de un ensayo denominado Triaxial Dinámico, el cual consiste en aplicar una variedad de presiones de confinamiento a una muestra con un cilindro rotatorio para simular las condiciones que esta experimentaría al soportar un pavimento. Luego según, Mendoza (2003) *“a través de un sistema de aplicación de carga, se somete a la probeta a un gran número de pulsos de magnitud y duración de la carga aplicada, registrando la fuerza y las deformaciones producidas”* El ensayo de módulo fue determinado bajo la norma AASHTO T294-92. La norma para el procedimiento de este ensayo, reconoce dos materiales sobre los cuales se puede realizar el ensayo:

Material Tipo 1. Suelos gruesos, no tratados. El 70% del material debe pasar por el Tamiz # 10 y un máximo del 20% puede pasar el tamiz #200

Material Tipo 2. Suelos finos, no tratados que no cumplen con los requisitos para ser clasificado como tipo 1.

Mendoza, B. F. M. L., & Lázares, W. G. (2003). *Ensayo de módulo resiliente*

Inicialmente Hveem y Carmany (1962) introdujeron el primer concepto de elasticidad en las subrasantes reconociéndolo como módulo dinámico de elasticidad el cual ayudaba a entender el agrietamiento por fatiga en la superficie del pavimento. Luego en 1955 el mismo autor asigna el término “Comportamiento resiliente de los pavimentos”, de manera que en ese mismo año Seed et al desarrollaron una prueba de laboratorio en el que se empezaron a obtener mediciones de este parámetro que caracteriza a las subrasantes. Por último, en el año 1962 Seed et al establecen el término de: “módulo resiliente” cuya definición es la siguiente:

*“Magnitud del esfuerzo desviador repetido en compresión triaxial dividido entre la deformación axial recuperable”* Según Seed et al, representado de la siguiente manera:



$$M_r = \frac{((\sigma_1 - \sigma_3)/2)}{\varepsilon_{Axial}} = \frac{\sigma_D}{\varepsilon_{Axial}}$$

Ecuación 9. Módulo resiliente Fuente: *Modulo de resiliencia en suelos finos y materiales granulares México 2001, Publicación técnica #142*

Donde:

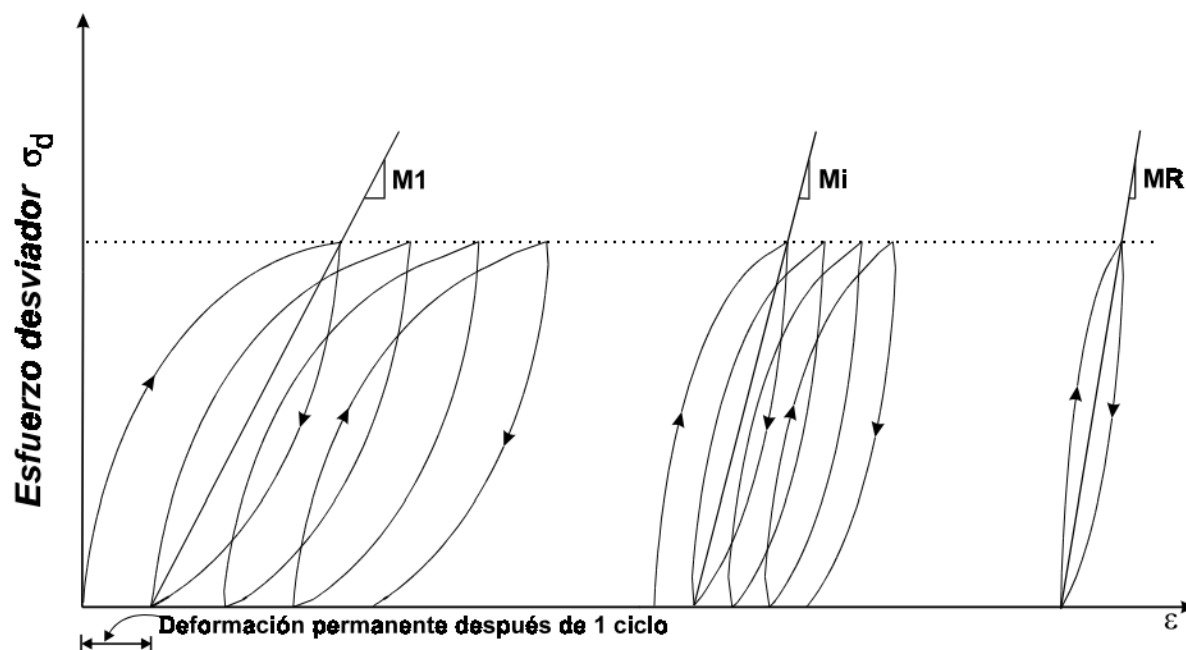
$\sigma_1$  = Esfuerzo principal mayor

$\sigma_3$  = Esfuerzo principal menor

$\sigma_D$  = Esfuerzo desviador

$\varepsilon_{Axial}$  = Deformación recuperable

Figura 4.



Nota: Representación gráfica de la acumulación de deformaciones residuales Fuente: Garnica, P. (2001) *Módulo de resiliencia en suelos finos y materiales granulares*.

## 10. Diseño metodológico

### 10.1 Desarrollo experimental

Para el desarrollo experimental de este proyecto de grado se realizó la variación de CBR de diseño de las estructuras de pavimentos cambiando de CBR 1%, hasta CBR 10% y a su vez se realizó la modelación con 4 correlaciones distintas presentadas a continuación:

Correlación 1

$$Mr = 2555 \times CBR^{0,64} (psi) - Mr = 17,6 \times CBR^{0,64} (MPa)$$

Ecuación 10. Autores: Lister y Powell, 1987 para el TRRL y adoptada por AASHTO 2002

Correlación 2

$$Mr = 1500 \times CBR (psi) - Mr = 10 \times CBR (MPa)$$

Ecuación 11. Autores: heukelom y Klomp, 1960, Adoptada por AASHTO 1993.

Correlación 3

$$Mr = 130 \times CBR^{0,714} (kg/cm^2)$$

Ecuación 12. Autores: National Cooperative Highway Research Program.

Correlación 4

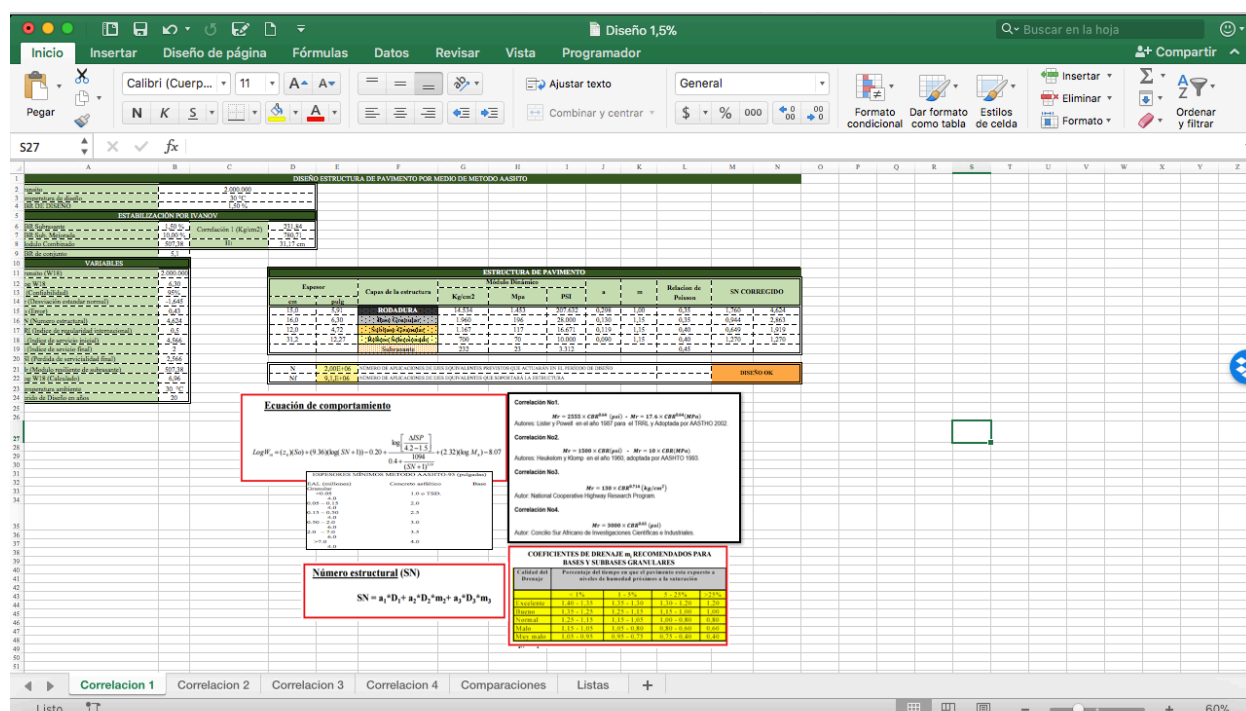
$$Mr = 3000 \times CBR^{0,65} (psi)$$

Ecuación 13. Autores: Concilio Sur Africano de Investigaciones científicas e industriales

### 10.2 Diseño de pavimento flexible a través de metodología ASSHTO 93.

Para la realización de los diseños se utilizó una macro de Excel basada en una hoja de cálculo suministrada por parte del tutor principal de la tesis, Ing. Abraham Castañeda. A continuación, se explicará el funcionamiento de la macro, a la cual se le deben suministrar datos de entrada:

Figura 5.



*Nota: Vista general de la Macro de Excel utilizada. Elaboración propia 2017*

1. **Variables Iniciales:** En la figura 4. se presentan los datos de entrada relevantes para el desarrollo de esta investigación, es decir, las variables cuyo valor debe ser variado con el propósito de realizar un comparativo.

Variables relevantes:

- CBR de diseño
- Correlación a utilizar

**Nota:** El tránsito de diseño y la temperatura son valores fijos para garantizar que la comparativa se realice netamente a los parámetros establecidos previamente.

Figura 6.

Transito	2.000.000		
Temperatura de diseño	30 °C		
CBR DE DISEÑO	1,50 %		
ESTABILIZACIÓN POR IVANOV			
CBR Subrasante	1,50 %	Correlación 1 (Kg/cm2)	231,84
CBR Sub. Mejorada	10,00 %		780,71
Modulo Combinado	507,38	H <sub>1</sub>	31,17 cm
CBR de conjunto	5,1		

*Nota: Vista de datos de entrada macro de Excel. Elaboración propia 2017.*

En los datos de entrada se encuentra una lista de selección de correlaciones, se debe escoger una correlación para que la macro calcule el resultado del módulo resiliente, calculado este último, la macro inmediatamente calcula el espesor necesario para realizar la estabilización según la metodología de Ivanov (Si aplica). La implementación de esta metodología se obtiene a través de una bisección programada por medio visual Basic, la cual busca un espesor de capa estabilizante tal, que genere un módulo equivalente representativo para un CBR de 5.1% con un error de  $1 \times 10^{-7}$  entre la subrasante y la capa estabilizante.

**Nota:** se optó por un CBR de 5,1% porque este se encuentra justo por encima del CBR mínimo que no requiere estabilización que sería uno del 5%.

	B	C	D	E	F
1	DISEÑO ESTRUCTURA DE PAVIMENTO POR ME				
2		2.000.000			
3		30 °C			
4		1,50 %			
5	ESTABILIZACIÓN POR IVANOV				
6	1,50 %	Correlación 1 (Kg/cm2)	231,84		
7	10,00 %		Correlación 1 (Kg/cm2)		
8	507,38	H <sub>i</sub>	Correlación 2 (Kg/cm2)		
9	5,1		Correlación 3 (Kg/cm2)		
10	VARIABLES		Correlación 4 (Kg/cm2)		
11	2.000.000				
12	6,30				
13	95%				
14	-1,645				
15	0,43				
16	4,624				
17	0,5				
18	4,566				
19	2				
20	2,566				
21	507,38				
22	6,96				

**2. Datos de entrada metodología ASHTO 93:** A continuación, se observa en la figura 7. los datos requeridos por la metodología para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles los cuales se mantuvieron constantes en cada uno de los diseños realizados, a excepción del módulo resiliente y el numero estructural, que varían mientras se cambia la correlación y el CBR de diseño.

**2. Datos de entrada metodología ASHTO 93:** A continuación, se observa en la figura 7. los datos requeridos por la metodología para el diseño de estructuras de pavimentos flexibles los cuales se mantuvieron constantes en cada uno de los diseños realizados, a excepción del módulo resiliente y el numero estructural, que varían mientras se cambia la correlación y el CBR de diseño.

Figura 8.

VARIABLES	
Transito (W18)	2.000.000
Log W18	6,30
R (Confiabilidad)	95%
Zr (Desviación estandar normal)	-1,645
So (Error)	0,43
SN (Numero estructural)	4,624
IRI (Indice de regularidad internacional)	0,5
Pi (Indice de servicio inicial)	4,566
Pt (Indice de servicio final)	2
PSI (Perdida de servicialidad final)	2,566
Mr (Modulo resiliente de subrasante)	507,38
Log W18 (Calculado)	6,96
Temperatura ambiente	30 °C
Periodo de Diseño en años	20

*Nota: Vista datos de entrada metodología AASHTO 93 Elaboración propia 2017.*

**3. Implementación de la metodología:** Consta de un resumen del cálculo de los espesores de la estructura de pavimento, donde se calcula el módulo de la carpeta asfáltica en función de la temperatura de diseño junto con los coeficientes de capa “a”. Luego se calculará el número estructural del diseño el cual será reemplazado en la ecuación No. 1, ecuación fundamental de AASHTO 93

Para el desarrollo de la metodología se inicia con espesores de capas propuestos por el diseñador en centímetros, la macro realiza la conversión a pulgadas, unidades exigidas por el método, si este no resulta ser un numero natural se redondea al entero siguiente de manera no pueden ser utilizados decimales para cumplir con las exigencias del método.

Se escogen la relación de Poisson, parámetro que depende del tipo de material y el coeficiente de drenaje el cual queda a criterio del diseñador según los parámetros y las condiciones climatológicas de la zona de diseño; El valor del coeficiente de drenaje está establecido en la tabla 3.

Figura 9..

ESTRUCTURA DE PAVIMENTO										
Espesor		Capas de la estructura	Módulo Dinámico			a	m	Relacion de Poisson	SN CORREGIDO	
cm	pulg		Kg/cm2	Mpa	PSI					
15,0	5,91	RODADURA	14.534	1.453	207.632	0,298	1,00	0,35	1,760	4,624
16,0	6,30	Base Granular	1.960	196	28.000	0,130	1,15	0,35	0,944	2,863
12,0	4,72	Subbase Granular	1.167	117	16.671	0,119	1,15	0,40	0,649	1,919
31,2	12,27	Releno Seleccionado	700	70	10.000	0,090	1,15	0,40	1,270	1,270
		Subrasante	232	23	3.312			0,45		

Nota: Vista Tabla resumen de espesores y sus características. Elaboración propia 2017.

- 4. Comprobación del diseño:** Relaciona el número de ejes equivalentes esperados y los que puede resistir la estructura según la metodología de diseño. La programación contempla un condicional el cual indica una celda que aprueba si el diseño cumple o no; para que el diseño cumpla el  $N_f$  debe ser igual o mayor al  $N$ .

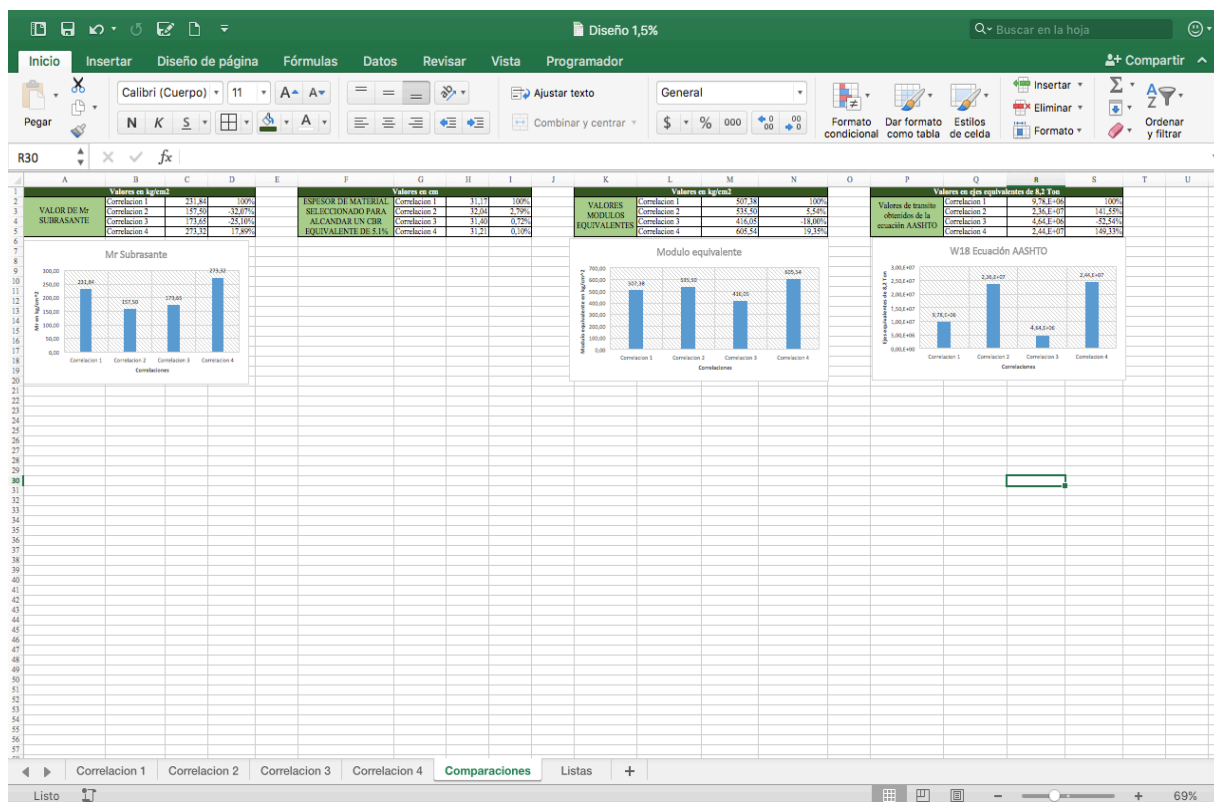
Figura 10.

N	2,00E+06	NÚMERO DE APLICACIONES DE EJES EQUIVALENTES PREVISTOS QUE ACTUARÁN EN EL PERÍODO DE DISEÑO		
$N_f$	9,1E+06	NÚMERO DE APLICACIONES DE EJES EQUIVALENTES QUE SOPORTARÁ LA ESTRUCTURA		DISEÑO OK

Nota: Vista tabla de resultados. Elaboración propia 2017.

- 5. Comparación matemática de los resultados:** Por último, se presenta un consolidado dentro del mismo libro en cual se presenta los resultados de la comparativa de los parámetros iniciales (módulo resiliente, capa estabilizante, ejes equivalentes) respecto a cada correlación implementada y un consolidado con datos porcentuales que hacen referencia a la comparación entre correlaciones para así generar un análisis respecto para determinar la sensibilidad de los resultados.

Figura 11.

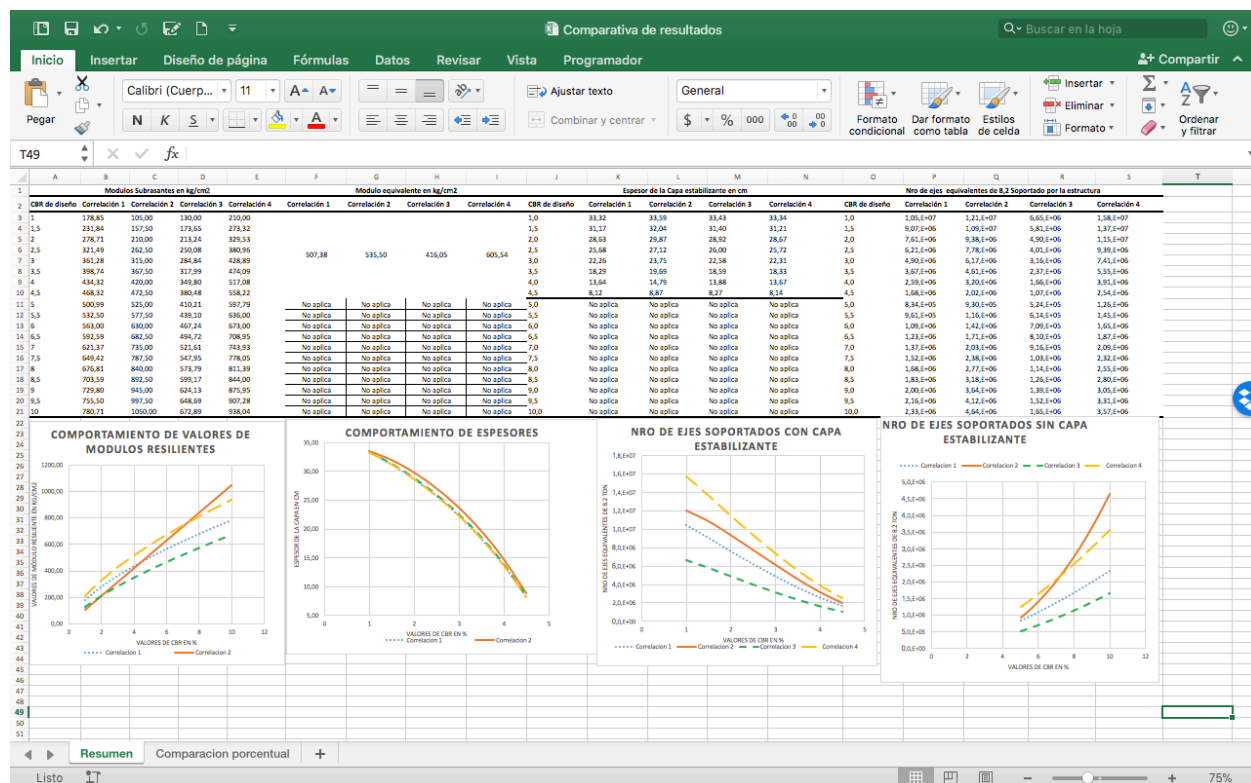


*Nota: Vista hoja de comparativa entre diseños. Elaboración propia 2017.*

Junto a la macro anteriormente explicada se utilizó una hoja de Excel en el cual se resumen los resultados obtenidos para realizar gráficos que dicten de manera más completa el comportamiento de las correlaciones frente al cambio del CBR.



Figura 12.



Nota: Vista hoja de resumen de resultados. Elaboración propia 2017.

### 10.3. Resumen de datos recolectados.

En la evaluación de módulo resiliente para las cuatro correlaciones seleccionadas se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.

*Módulos Subrasantes en kg/cm<sup>2</sup>*

CBR de diseño	Correlación 1	Correlación 2	Correlación 3	Correlación 4
1	178,85	105,00	130,00	210,00
1,5	231,84	157,50	173,65	273,32
2	278,71	210,00	213,24	329,53
2,5	321,49	262,50	250,08	380,96

3	361,28	315,00	284,84	428,89
3,5	398,74	367,50	317,99	474,09
4	434,32	420,00	349,80	517,08
4,5	468,32	472,50	380,48	558,22
5	500,99	525,00	410,21	597,79
5,5	532,50	577,50	439,10	636,00
6	563,00	630,00	467,24	673,00
6,5	592,59	682,50	494,72	708,95
7	621,37	735,00	521,61	743,93
7,5	649,42	787,50	547,95	778,05
8	676,81	840,00	573,79	811,39
8,5	703,59	892,50	599,17	844,00
9	729,80	945,00	624,13	875,95
9,5	755,50	997,50	648,69	907,28
10	780,71	1050,00	672,89	938,04

*Nota: Resumen resultados obtenidos módulos resilientes. Elaboración propia 2017..*

Tabla 5.

*Espesor de la Capa estabilizante en cm*

<b>CBR de diseño</b>	<b>Correlación 1</b>	<b>Correlación 2</b>	<b>Correlación 3</b>	<b>Correlación 4</b>
1,0	33,32	33,59	33,43	33,34
1,5	31,17	32,04	31,40	31,21
2,0	28,63	29,87	28,92	28,67
2,5	25,68	27,12	26,00	25,72
3,0	22,26	23,75	22,58	22,31
3,5	18,29	19,69	18,59	18,33
4,0	13,64	14,79	13,88	13,67
4,5	8,12	8,87	8,27	8,14

*Nota: Resumen resultados obtenidos espesores de capa estabilizante. Elaboración propia 2017.*

Tabla 6.

*Nro. de ejes equivalentes de 8,2 Soportado por la estructura*

<b>CBR de diseño</b>	<b>Correlación 1</b>	<b>Correlación 2</b>	<b>Correlación 3</b>	<b>Correlación 4</b>
1,0	1,05,E+07	1,21,E+07	6,65,E+06	1,58,E+07
1,5	9,07,E+06	1,09,E+07	5,81,E+06	1,37,E+07
2,0	7,61,E+06	9,38,E+06	4,90,E+06	1,15,E+07

2,5	6,21,E+06	7,78,E+06	4,01,E+06	9,39,E+06
3,0	4,90,E+06	6,17,E+06	3,16,E+06	7,41,E+06
3,5	3,67,E+06	4,61,E+06	2,37,E+06	5,55,E+06
4,0	2,59,E+06	3,20,E+06	1,66,E+06	3,91,E+06
4,5	1,68,E+06	2,02,E+06	1,07,E+06	2,54,E+06
5,0	8,34,E+05	9,30,E+05	5,24,E+05	1,26,E+06
5,5	9,61,E+05	1,16,E+06	6,14,E+05	1,45,E+06
6,0	1,09,E+06	1,42,E+06	7,09,E+05	1,65,E+06
6,5	1,23,E+06	1,71,E+06	8,10,E+05	1,87,E+06
7,0	1,37,E+06	2,03,E+06	9,16,E+05	2,09,E+06
7,5	1,52,E+06	2,38,E+06	1,03,E+06	2,32,E+06
8,0	1,68,E+06	2,77,E+06	1,14,E+06	2,55,E+06
8,5	1,83,E+06	3,18,E+06	1,26,E+06	2,80,E+06
9,0	2,00,E+06	3,64,E+06	1,39,E+06	3,05,E+06
9,5	2,16,E+06	4,12,E+06	1,52,E+06	3,31,E+06
10,0	2,33,E+06	4,64,E+06	1,65,E+06	3,57,E+06

---

*Nota: Resumen resultados obtenidos número de ejes equivalentes soportados. Elaboración propia 2017.*

## **11 Análisis de resultados.**

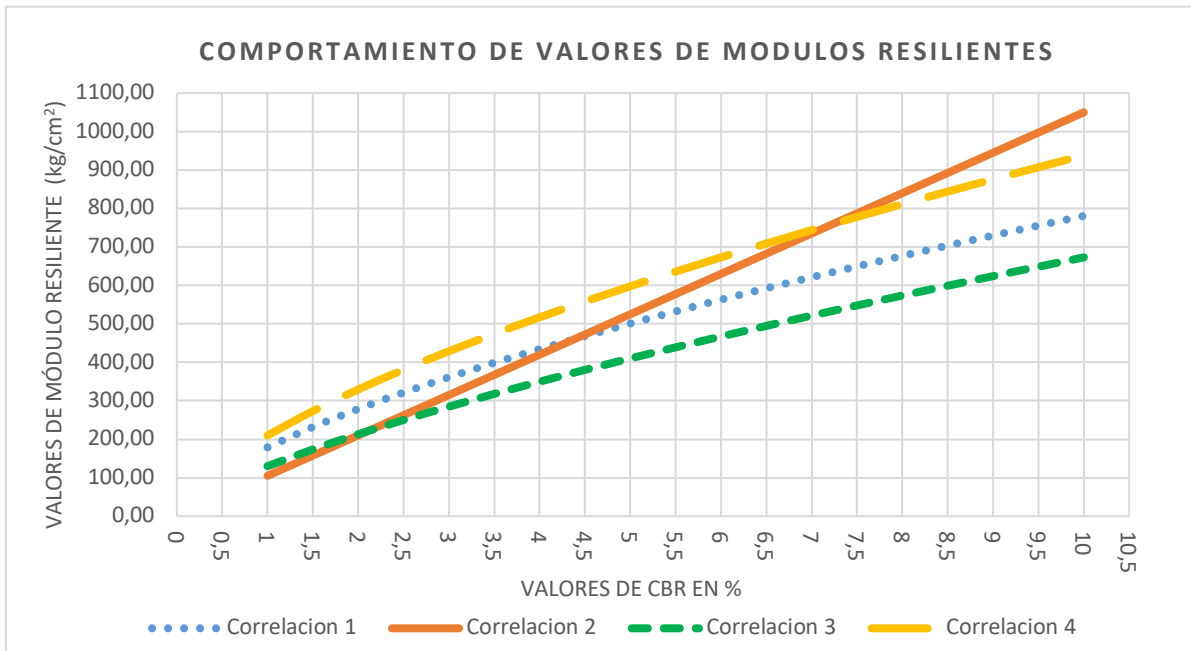
Para el análisis de resultados se tendrán en cuenta los parámetros directamente influenciados (El espesor de la capa estabilizante, el modulo combinado y el módulo resiliente en sí) por el módulo resiliente durante proceso de diseño de estructuras de pavimentos flexibles según la metodología de AASHTO 93, es decir, todos aquellos que se ven afectados por el valor obtenido al usar cada una de las correlaciones que son parte de la investigación.

Los parámetros que se ven influenciados por este módulo durante la realización de diseños de pavimentos flexibles son: el módulo equivalente para estabilización de subrasantes propuesto por Ivanov (Si los CBR son menores a 5.1%) y como se ve afectada la capacidad estructural para determinar el número de ejes equivalentes que soporta la estructura de acuerdo a la metodología anteriormente nombrada.

Los datos de los diseños se encuentran resumidos en las tablas 4, 5 y 6., donde se encuentran todos los resultados de los parámetros a comparar correspondiente a cada uno de los diseños realizados con la macro de Excel usada para la modelación de la estructura. respalda lo mostrado en las gráficas con líneas de comportamiento muy similares.

### **11.1 Comparativa de resultados para módulos resiliente**

Figura 13.



Nota: Grafica Modulo resiliente vs CBR. Elaboración propia 2017.

En la figura 13 se puede observar el comportamiento del módulo resiliente para la variación del CBR correspondiente a cuatro correlaciones utilizadas, se puede apreciar que con un CBR de 1 a 7% la correlación que presenta valores más altos de módulo resiliente es la numero 4. La correlación 1 genera valores superiores frente a los dados por la correlación 3, además sus resultados son mayores que los de la correlación 2 en el rango de 1 a 4%, mientras que esta última cuenta con un comportamiento lineal como era de esperarse debido a la forma de su ecuación. Por su parte la correlación número 2, partir de CBR de 7,5% cuenta con los valores más altos de módulo resiliente con amplia diferencia con respecto a las correlaciones 1 y 3, además de una diferencia significativa con respecto a la numero 4.

Según los resultados obtenidos en la figura 13 las correlaciones 1, 3 y 4 se puede inferir que el comportamiento del módulo resiliente del suelo conforme al aumento de valores de CBR no es lineal, lo que indica que el comportamiento de las Subrasantes no pueden ser

descritos ni entendidos completamente dado que en los modelos matemáticos para su obtención se basan en hipótesis asumidas por los autores, mientras que la correlación 2 no tiene en cuenta esta situación al presentar un comportamiento lineal.

**Nota:** Se toma la correlación 1 como el estándar para la comparación porcentual frente a las otras, teniendo en cuenta que esta fue adoptada por la AASHTO como correlación recomendada en la última versión de su metodología presentada en el 2002.

Tabla 7.

*Comparativa Porcentual Módulo Resiliente*

<b>CBR de diseño</b>	<b>Correlaciones 1 - 2</b>	<b>Correlaciones 1 – 3</b>	<b>Correlaciones 1 – 4</b>
1,0	-41,29%	-27,31%	17,42%
1,5	-32,07%	-25,10%	17,89%
2,0	-24,65%	-23,49%	18,23%
2,5	-18,35%	-22,21%	18,50%
3,0	-12,81%	-21,16%	18,71%
3,5	-7,84%	-20,25%	18,90%
4,0	-3,30%	-19,46%	19,06%
4,5	0,89%	-18,76%	19,20%
5,0	4,79%	-18,12%	19,32%
5,5	8,45%	-17,54%	19,44%
6,0	11,90%	-17,01%	19,54%
6,5	15,17%	-16,51%	19,64%
7,0	18,29%	-16,06%	19,72%
7,5	21,26%	-15,63%	19,81%
8,0	24,11%	-15,22%	19,88%
8,5	26,85%	-14,84%	19,96%
9,0	29,49%	-14,48%	20,03%
9,5	32,03%	-14,14%	20,09%
10,0	34,49%	-13,81%	20,15%

*Nota: Comparativa porcentual de resultados módulo resiliente, tomando la correlación 1 como base para la comparativa. Elaboración propia 2017.*

Para valores de CBR entre 1 y 4% la correlación 2 presenta valores menores con respecto a la correlación 1, la variación se presenta de la siguiente manera:

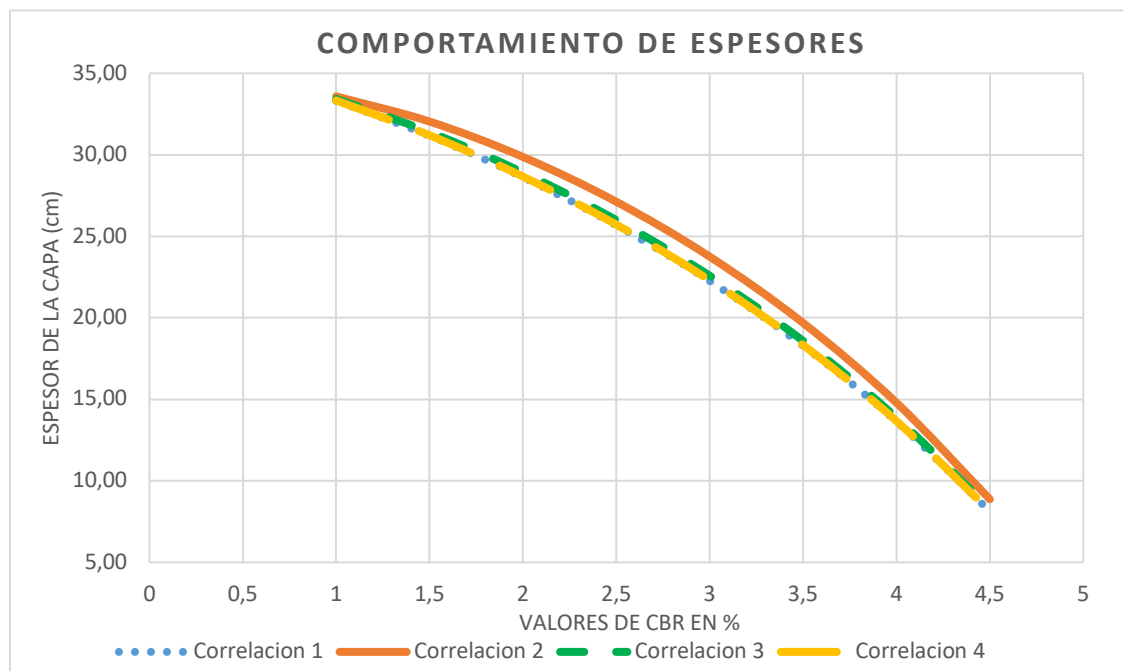
Para un CBR de 1% esta correlación presenta una magnitud 41,29% menor que la correlación 1, rango de valores que se van reduciendo, de tal manera que, para un CBR de 4% los valores de módulos tienen una diferencia tan solo 3,3%, sin embargo, a partir de un CBR de 4,5% hasta 10%, la correlación 2 presenta valores más altos que la correlación 1, que representan diferencias que van desde 0,89% hasta un 34,49%.

En cuanto a la correlación 3 los valores de modulo son menores para todos los rangos de CBR modelados, sin embargo, la diferencia para un CBR de 1% es de -27,31%, la cual va disminuyendo hasta que con un CBR de 10% llega a -13,81%, si se proyectan los comportamientos de ambas correlaciones, es decir, la numero 1 y 3, el comportamiento anteriormente explicado continua hasta CBR de alrededor de 75% en el cual comienza a presentar valores mayores de modulo la correlación 3, que vendría representando una disminución del 13,50% con respecto al aumento del 100% de CBR.

Al analizar la comparación con la correlación 4, se observa que esta presenta un comportamiento totalmente diferente respecto a las anteriores, pues para un CBR de 1% la correlación 4 presenta magnitudes de módulos resiliente un 17,42% mayor y esta aumenta hasta un 20,15% al llegar a un CBR de 10%, lo que representa una que para un aumento de CBR del 100% solo representa un incremento del 2,73%, lo que

## **11.2 Comparativa resultados espesores de capas estabilizantes.**

Figura 14.



*Nota: Grafica Espesores estabilizantes vs CBR. Elaboración propia 2017.*

Como se puede observar en la Figura 14, el espesor de la capa estabilizante no se ve realmente afectada por la escogencia de las correlaciones, a excepción de la correlación número 2, que presenta valores de espesores más altos en un rango de 0,75 a 1,5 cm de diferencia, a comparación de las otras tres correlaciones que constituyen un incremento de hasta 9,2% aproximadamente.

Tabla 8.

*Comparativa porcentual Espesores de capas Estabilizantes.*

CBR de diseño	Correlaciones 1 - 2	Correlaciones 1 - 3	Correlaciones 1 - 4
1,0	0,80%	0,33%	0,05%
1,5	2,79%	0,72%	0,10%
2,0	4,35%	1,02%	0,14%
2,5	5,63%	1,26%	0,17%
3,0	6,71%	1,45%	0,20%
3,5	7,65%	1,62%	0,22%



4,0	8,47%	1,76%	0,24%
4,5	9,20%	1,89%	0,25%

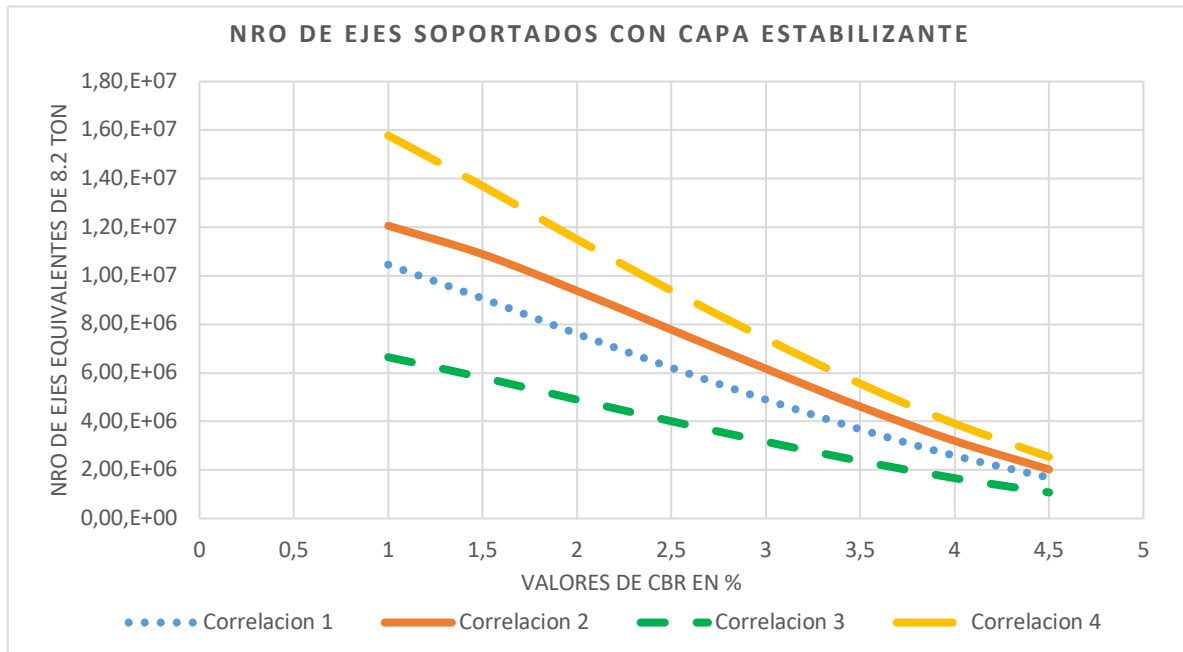
*Nota: Comparativa porcentual de resultados espesor capa estabilizante, tomando la correlación 1 como base para la comparativa. Elaboración propia 2017.*

La correlación 2 necesita espesores mayores para generar una estructura con el modulo combinado lo suficientemente alto para que este sea representativo para un CBR de 5.1, ya que la metodología Ivanov da más importancia al módulo de la subrasante que al módulo de la capa de material estabilizante, y debido que la correlación 2 en CBR de 1 a 3% representa suelos finos es congruente que necesite espesores algo mayores a las demás. Las correlaciones 1, 3 y 4 tienen exponentes menores que uno, lo que indica que al despejar el CBR de la ecuación reduce el número el resultado del otro lado de la igualdad, por lo que los son ligeramente menores desde CBR de 1,5 a 4,5% siendo el rango más crítico los CBR de 2,5 a 3%.

En cuanto a las correlaciones 1, 3 y 4 sus comportamientos son muy similares, tanto que las diferencias son despreciables entre sí, presentando diferencias no mayores de 2%, es decir 0,02 hasta 0,30 cm de manera tal que los espesores siempre tienen el mismo número entero y solo sus decimales varían, lo que causa que en durante el proceso constructivo los espesores sean los mismos por que no sería determinante la escogencia de una correlación si solo se tienen en cuenta estas tres y solo para el espesor de material seleccionado para estabilización con un CBR de 10%.

### **11.3 Comparativo número de ejes equivalentes soportados para diseños con capas estabilizantes**

Figura 15.



*Nota: Grafica Nro. ejes equivalentes vs CBR, con capa estabilizante. Elaboración propia 2017.*

Se separaron los diseños con CBR menores a 5%, (debido a la exigencia de la metodología la cual indica que suelos con CBR menores a este valor necesitan ser estabilizados) de los que no lo necesitan, pues se debe tener en cuenta que la capa de estabilizante realiza un aporte estructural al pavimento.

La figura 15 indica claramente que a medida que aumenta el CBR de la subrasante, la capacidad estructural del pavimento va disminuyendo, esto se presenta como consecuencia de la reducción del espesor de la capa de material seleccionado para estabilización, la cual aporta estructuralmente aumentando el SN del pavimento.

En cuanto al comportamiento de las correlaciones, se puede apreciar a simple vista que las correlaciones 2 y 4 son las que generan mayor capacidad estructural frente al paso de ejes equivalentes, mientras que las correlaciones 1 y 3, siendo esta ultima la que presenta menor

capacidad, lo que es consecuente con lo establecido en la comparación entre los valores de módulos realizado anteriormente.

Previamente se estableció que la correlación 4 presenta valores de módulo resiliente mayores que la correlación 2 en subrasantes con CBR menores de 7.5%, que al ser reemplazados en la ecuación 8, de modulo equivalente planteada por Ivanov, tendrá mayor incidencia este módulo resiliente de la subrasante que el módulo resiliente de la capa estabilizante.

Por lo anterior, se puede afirmar que en diseños que requieran estabilización y que se utilice la metodología de Ivanov, la implementación de la correlación 4 es recomendable para obtener módulos combinados de magnitudes mayores que al ser utilizados en la metodología AASHTO 93 para pavimentos flexibles se obtendrán estructuras más esbeltas, que representan de manera acertada suelos granulares.

Tabla 9.

*Comparativa porcentual Numero de ejes equivalentes de 8,2 ton soportados por las estructuras con estabilización.*

<b>CBR de diseño</b>	<b>Correlaciones 1 - 2</b>	<b>Correlaciones 1 - 3</b>	<b>Correlaciones 1 - 4</b>
1,0	15,34%	-36,44%	50,89%
1,5	20,10%	-35,94%	51,05%
2,0	23,29%	-35,63%	51,14%
2,5	25,23%	-35,47%	51,19%
3,0	26,00%	-35,43%	51,20%
3,5	25,54%	-35,51%	51,17%
4,0	23,71%	-35,73%	51,10%
4,5	20,28%	-36,12%	50,98%

*Nota: Comparativa porcentual de resultados numero ejes equivalentes soportados con capa estabilizante, tomando la correlación 1 como base para la comparativa. Elaboración propia 2017.*

Se puede observar que el espesor de la capa estabilizante no es un factor sensible en esta comparativa, dado que la diferencia de espesor no supera el 9% como se observa en la tabla

9, entre las correlaciones 1 y 2, sin embargo, el módulo resiliente genera un impacto significativo en el número de ejes equivalentes, que según diseño soportaría la estructura.

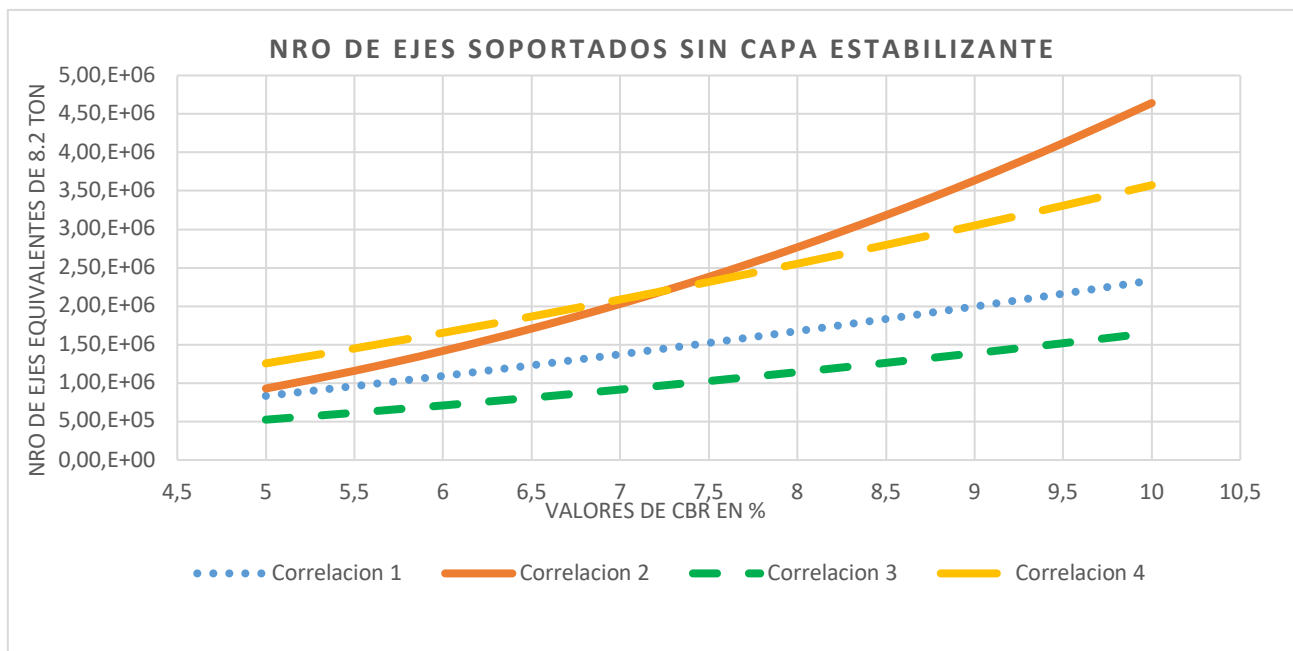
La correlación 2 presenta un espesor de capa estabilizante de 0,80% mayor que la correlación 1 que se consideraría irrelevante, mientras que el módulo resiliente de la correlación 2 es -41,29% menor, sin embargo, la estructura diseñada con la numero 2 soporta un 15,34% más que la diseñada con la correlación 1, y eso se debe a la pequeña diferencia de material para estabilización que tan solo unos decimales representa millones de ejes más de soporte en el diseño de la estructura debido al aporte que hace esta al SN.

Si se compara la correlación 1 y 3, se presenta todo lo contrario a lo anterior, lo que va acorde con lo esperado debido que al presentar valores de módulos menores en un -27,31% de modulo para CBR de 1%, resaltando que hasta un CBR de 10% los valores siguen siendo menores aunque se reduce la diferencia hasta un -13,81%, y en el caso de los espesores para el primer valor de CBR la diferencia es de 0,30% que aun aumentando hasta 4,5% no se presenta una variación que sea significativa razón por la cual la diferencia nuevamente es producida por el módulo resiliente y su incidencia en la ecuación AASTHO, que al representar un -27,31% de diferencia la estructura diseñada con la correlación 3 soportara -36,44% que representa 3.810.385, ejes equivalentes menos que el diseño de la correlación 1.

Por último tenemos la ecuación 1 y 4, comparativa donde las diferencias se hacen más notables pues la diferencia entre estas en de 17,42% a favor de la correlación 4 para CBR de 1%, sin embargo, esta representa una capacidad de soporte del 50,89% más de ejes equivalentes de 8,2 ton, sin embargo, no varía mucho conforme varia el CBR de diseño pues para CBR de 4,5% la diferencia llega a ser de 19,20% y la capacidad de soporte llega a ser un 50,98% es decir la variación no es realmente sensible.

#### 11.4 Comparativa número de ejes equivalentes soportados para diseños sin capas estabilizantes

Figura 16.



Nota: Gráfica Nro. ejes equivalentes vs CBR, sin capa estabilizante. Elaboración propia 2017.

El comportamiento representado en la figura 15 ha sido el esperado teniendo en cuenta los análisis iniciales, se puede evidencia la sensibilidad del módulo resiliente dentro de la metodología AASHTO 93 para el diseño de pavimentos flexibles, si se tiene en cuenta que el valor arrojado por la correlación tiene incidencia directa en la ecuación, cuyo resultado es elevado a la décima potencia para determinar el número de ejes equivalentes que la estructura soportaría según la metodología de diseño.

Por otra parte, se pueden identificar 3 puntos importancia en el mismo gráfico:

- Cuando el CBR es del 5%, muestra el punto donde las diferencias de ejes de 8.2 Ton soportados entre las correlaciones son menores.
- Cuando el CBR llega a 7,5%, la correlación 2 cambia su comportamiento, tomando valores mayores a los de la correlación 4
- Cuando el CBR toma un valor de 10%, donde la correlación 2 supera por valores altísimos a la correlación 4 y a las correlaciones 1 y 3.

Tabla 10.

*Numero de ejes equivalentes de 8,2 ton soportados por las estructuras sin estabilización*

<b>CBR de diseño</b>	<b>Correlaciones 1 - 2</b>	<b>Correlaciones 1 – 3</b>	<b>Correlaciones 1 - 4</b>
5,0	11,47%	-37,11%	50,66%
5,5	20,71%	-36,07%	50,99%
6,0	29,81%	-35,11%	51,30%
6,5	38,78%	-34,21%	51,58%
7,0	47,64%	-33,37%	51,84%
7,5	56,40%	-32,58%	52,08%
8,0	65,06%	-31,83%	52,31%
8,5	73,63%	-31,11%	52,52%
9,0	82,12%	-30,43%	52,73%
9,5	90,54%	-29,79%	52,92%
10,0	98,88%	-29,16%	53,10%

*Nota: Comparativa porcentual de resultados numero ejes equivalentes soportados sin estabilización, tomando la correlación 1 como base para la comparativa. Elaboración propia 2017.*

Para el primer CBR se evidencia en la tabla 10 que la correlación 2 soporta más ejes en un 11.47%, que si se traduce a números reales equivaldría a 95.662 ejes equivalentes, lo cual no es una cifra significativa al momento de diseñar, mientras que, si vamos a la correlación 4 en el mismo valor de CBR, se obtiene una diferencia del 50,66%, lo que equivale a 422.434 ejes equivalentes que soportaría la correlación 4. Evaluando los valores anteriores en un posible diseño se observaría un aumento significativo en la capacidad estructural del mismo.

Por su parte la correlación 3 sigue siendo la más conservadora presentando valores un 37,11% por debajo de la correlación 1 que representa una diferencia de 309.472 ejes equivalentes en la capacidad estructural.

En el segundo punto, por primera vez la correlación 2 genera resultados con capacidades estructurales mayores que la correlación 4.

Por ultimo en el tercer cuando CBR es de 10%, se observa la amplia diferencia entre las capacidades estructurales de las cuatro correlaciones donde las numero 1 y 3, son las más conservadoras, es decir, se obtendrán estructuras de pavimentos con mayores espesores, mientras que las numero 2 y 4, son menos conservadoras y en el caso más crítico superan a la correlación 1 con un 98,88% y 53,10%, respectivamente siendo esta la diferencia más significativa a lo largo de las variaciones de CBR.

### 11.5 Comparativa de módulos equivalentes

Tabla 11.

*Modulo equivalente en kg/cm<sup>2</sup>*

CBR de diseño	Correlación 1	Correlación 2	Correlación 3	Correlación 4
1 a 5%	507,38	535,50	416,05	605,54

*Nota: Estos valores son obtenidos por medio de la metodología de Ivanov y solo aplican para lograr un CBR representativo de 5,1% con las correlaciones escogidas. Elaboración propia 2017..*

En cuanto al módulo equivalente, el cual es el resultado de la implementación de la metodología de Ivanov para estabilización de subrasantes, se puede observar claramente que la correlación 2 y 4 siguen presentando los valores más altos de modulo, aunque se observa que la numero 2 cuenta con un valor menor y eso se debe a que para los CBR de 1 a 3% que

anteriormente se ha explicado representan muy bien a suelos finos con valores de módulos muy bajos que al implementarlos en la ecuación presentada por el autor, la cual da más responsabilidad a la subrasante, se genera un valor menor de modulo equivalente lo que conlleva a capas de material estabilizante mayores y por consiguiente una estructura con capacidad estructural mayor a las demás teóricamente hablando, sin embargo, esto no garantiza que durante su vida útil la estructura con cuenta con un mejor desempeño o mayor capacidad real.

Para realizar un análisis más diciente se presenta a continuación un ejemplo práctico en el que se diseñara una estructura de pavimento flexible por medio de las cuatro correlaciones que se están comparando en este escrito para determinar la diferencia entre los espesores de las capas que conforman las estructuras con un mismo tránsito, CBR y temperatura, es decir, emular el diseño de una estructura real con las diferentes correlaciones dispuesta en el estudio.

### **11.6 Ejemplo Práctico.**



Figura 17.



*Nota: Localización de la vía a intervenir. Fuente: Google Earth Pro 2017*

En la costa Atlántica colombiana se llevan a cabo proyectos para el mejoramiento de la infraestructura vial generando una red que permita la conectividad vial del país y los municipios que la conforman, razón por la cual se pide que se realice un diseño de pavimento flexible para el proyecto “**CONSTRUCCIÓN DE LA VIA CUESTECITA 4 DE NOVIEMBRE TROCAL ORIENTE, DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA**” la cual dispone de 10,490 km de longitud, con un numero de ejes equivalentes de 1.800.000 de 8,2 toneladas, para una proyección de 10 años y con una temperatura de 30 °C A continuación se presentan los CBR entregados por el laboratorio encargado de realizar la exploración de la subrasante:

Tabla 12.

*CBR recolectados*

<b>Abscisa</b>	<b>CBR (%)</b>
KM 0+500	9,67
KM 1+000	8,74
KM 1+500	10,06
KM 2+000	9,90
KM 2+500	11,60

KM 3+000	9,28
KM 3+500	9,09
KM 4+000	8,51
KM 4+500	9,57
KM 5+000	8,90
KM 5+500	9,48
KM 6+000	8,12
KM 6+500	8,55
KM 7+000	9,17
KM 7+500	8,51
KM 8+000	9,55
KM 8+500	8,90
KM 9+000	11,60
KM 9+500	10,00
KM 10+000	9,48

*Nota: Los valores CBR son tomados del diseño original de la estructura de pavimento.*

#### **11.6.1 Determinación tramos homogéneos:**

A través del método de las diferencias acumuladas se busca dividir el tramo total de la vía en sectores que cuenten con CBR relativamente semejantes entre si y puedan tener un diseño optimo y real de acuerdo a las características suelo. Este método se obtiene realizando el cálculo de unos parámetros estadísticos, una vez obtenidos estos últimos se debe generar una gráfica de estos vs el abscisado para así poder sectorizar los tramos.

#### **11.6.2 Parámetros estadísticos del método**

Para determinar el CBR característico de cada uno de los tramos homogéneos existen diversos métodos como el criterio del instituto de asfalto y el criterio de la media, siendo este último el empleado en este ejercicio de diseño.

El criterio de la media consiste en determinar aquel valor en el cual la mitad de los valores quede por encima y la otra mitad quede por debajo de este valor calculado, al valor seleccionado, se le disminuye un valor  $Z$  la desviación estándar, el cual depende del nivel de confianza que se le dará al pavimento. Por tal motivo el CBR de diseño es:

$$CBR_{Diseño} = \overline{CBR} - (Z \times \sigma)$$

Ecuación 15. CBR de diseño según criterio de la media. Fuente:

Donde

$Z$ : Desviación normal estándar

$\sigma$ = Desviación estándar de los valores de CBR

$\overline{CBR}$ = Valor medio de los valores de CBR (%)

**Abscisa:** Coordenada horizontal correspondiente a los datos ofrecidos.

**CBR:** Parámetro del suelo dado correspondiente a un punto de la vía

**Distancia entre intervalos:** Diferencia en metros de la abscisa inicial con respecto a la anterior en un punto

**Distancia acumulada:** Sumatoria de la distancia de la abscisa en ese punto con las abscisas anteriores.

**CBR promedio:** Promedio del CBR de la abscisa de ese punto y la abscisa inmediatamente anterior

**Área:** Producto de la distancia entre abscisas y el CBR promedio en ese punto

**Área acumulada:** Sumatoria del área de la abscisa y el área inmediatamente anterior

**$Zx = ((\text{Area acumulada} - F) * \text{Distancia acumulada})$**

Ecuación 13.

$$\text{Factor } F = \frac{\sum \text{Área}}{\sum \text{Distancia}}$$

Ecuación 14.

Teniendo en cuenta los datos de laboratorio suministrados para poder realizar el diseño, se realizó respectivo procedimiento para hallar los parámetros estadísticos y se obtuvo como resultado la tabla 13 con los parámetros estadísticos y la Figura 18

Tabla 13.

*Método de las diferencias acumuladas.*

<i>Abcisa</i>	<i>CBR</i>	<i>Distancia entre abscisas</i>	<i>Distancia acumulada</i>	<i>CBR prom intervalos</i>	<i>Área</i>	<i>Área acumulada</i>	<i>Zx</i>
		0					0,00
0+500	9,67	500	500	9,67	4835	4835,0	115,63
1+000	8,74	500	1000	9,205	4602,5	9437,5	-1,25
1+500	10,06	500	1500	9,4	4700	14137,5	-20,63
2+000	9,90	500	2000	9,98	4990	19127,5	250,00
2+500	11,60	500	2500	10,75	5375	24502,5	905,63
3+000	9,28	500	3000	10,44	5220	29722,5	1406,25
3+500	9,09	500	3500	9,185	4592,5	34315,0	1279,38
4+000	8,51	500	4000	8,8	4400	38715,0	960,00
4+500	9,57	500	4500	9,04	4520	43235,0	760,63
5+000	8,90	500	5000	9,235	4617,5	47852,5	658,75
5+500	9,48	500	5500	9,19	4595	52447,5	534,38
6+000	8,12	500	6000	8,8	4400	56847,5	215,00
6+500	8,55	500	6500	8,335	4167,5	61015,0	-336,88
7+000	9,17	500	7000	8,86	4430	65445,0	-626,25
7+500	8,51	500	7500	8,84	4420	69865,0	-925,63
8+000	9,55	500	8000	9,03	4515	74380,0	-1130,00
8+500	8,90	500	8500	9,225	4612,5	78992,5	-1236,88

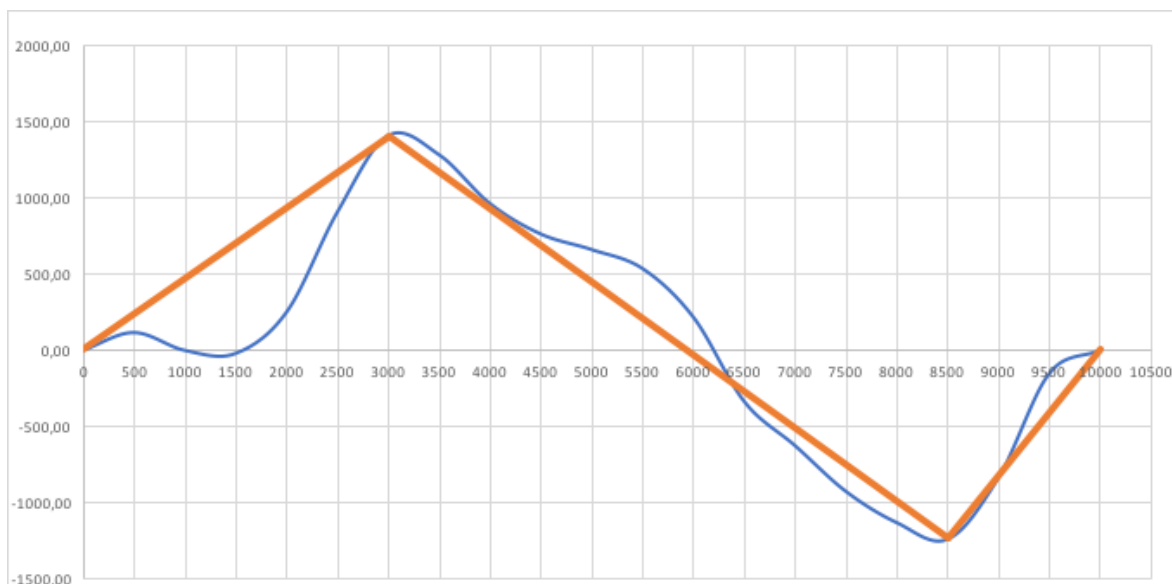
## ANALISIS DE CORRELACIONES PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE

69

9+000	11,60	500	9000	10,25	5125	84117,5	-831,25
9+500	10,00	500	9500	10,8	5400	89517,5	-150,63
10+000	9,48	500	10000	9,74	4870	94387,5	0,00
Sumatoria		<b>10000</b>	Sumatoria		<b>94387,5</b>		

*Nota: Resultados de metodo diferencias acumuladas. Fuente: Elaboración propia*

Figura 18. Grafico para determinar tramos homogéneos.



*Nota: Grafico para determinar tramos homogéneos. Elaboración propia 2017.*

Producto de la figura 18, se tomaron los tramos homogéneos los cuales quedaron distribuidos de la siguiente manera:

Tabla 14.

### *Tramos Homogéneos*

<i>Tramo</i>	<i>Abscisa inicial</i>	<i>Abscisa final</i>
1	0	3+000
2	3+000	8+500
3	8+500	10+000

*Nota: Resumen tramos homogéneos determinados. Elaboración propia 2017.*

De los tramos homogéneos identificados se determina el CBR característico o de diseño para cada uno obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 15.

*Primer tramo homogéneo*

<i>Abscisa</i>	<i>CBR</i>	<i>CBR Prom entre capas</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Zr</i>	<i>CBR Característico</i>
0+500	9,67	9,67			
1+000	8,74	9,21			
1+500	10,06	9,40			
2+000	9,90	9,98	0,97	0,841	9,18
2+500	11,60	10,75			
3+000	9,28	10,44			
<b>CBR PROM</b>	<b>9,994</b>				

*Nota: Resultados criterio de la media tramo homogéneo no. 1. Elaboración propia 2017..*

Tabla 16.

*Segundo tramo homogéneo*

<i>Abscisa</i>	<i>CBR</i>	<i>CBR Prom entre capas</i>	<i>Desviación estándar</i>	<i>Zr</i>	<i>CBR Característico</i>
3+000	9,28	10,44			
3+500	9,09	9,185			
4+000	8,51	8,8			
4+500	9,57	9,04			
5+000	8,90	9,235			
5+500	9,48	9,19	0,47	0,841	8,57
6+000	8,12	8,8			
6+500	8,55	8,335			
7+000	9,17	8,86			
7+500	8,51	8,84			
8+000	9,55	9,03			
8+500	8,90	9,225			
<b>CBR PROM</b>	<b>8,97</b>				

*Nota: Resultados criterio de la media tramo homogéneo no. 2. Elaboración propia 2017.*

Tabla 17.

*Tramo homogéneo nro. 3*

Abscisa	CBR	CBR Prom entre capas	Desviación estándar	Zr	CBR Característico
8+500	8,90	9,225	1,16	0,841	9,02
9+000	11,60	10,25			
9+500	10,00	10,8			
10+000	9,48	9,74			
<i>CBR PROM</i>	<i>10,00</i>				

*Nota: Resultados criterio de la media tramo homogéneo no.3. Elaboración propia 2017.*

:

### 11.6.3 Resultados obtenidos

Tabla 18.

Resultados ejes equivalente tramo 1

Correlaciones	Módulo resiliente	Nro. Ejes equivalentes	
	Kg/cm <sup>2</sup>	Aashto	Racional
1	739,06	4.555.855	2.059.313
2	963,80	8.434.987	2.180.442
3	632,97	3.180.076	1.987.185
4	887,23	6.961.154	2.142.397

*Nota: Resultados obtenidos, numero de ejes equivalentes soportados según metodología AASHTO y corroborado por método racional tramo homogéneo no. 1. Elaboración propia 2017..*

Tabla 19.

Resultados Tramo 2

Correlaciones	Módulo resiliente	Nro. Ejes equivalentes	
	Kg/cm <sup>2</sup>	Aashto	Racional
1	707,46	4.116.557	2.038.026
2	900,18	7.199.105	2.149.936
3	602,85	2.839.946	1.966.863
4	848,71	6.279.967	2.122.460

## ANALISIS DE CORRELACIONES PARA DETERMINAR EL MODULO RESILIENTE

72

*Nota: Resultados obtenidos, numero de ejes equivalentes soportados según metodología AASHTO y corroborado por método racional tramo homogéneo no. 2. Elaboración propia 2017.*

Tabla 20.

### Resultados Tramo 3

Correlaciones	Módulo resiliente	Nro. Ejes equivalentes	Nro. Ejes equivalentes
	Kg/cm <sup>2</sup>	Aashto	Racional
1	730,79	4.438.400	2.054.558
2	947,00	8.097.672	2.172.763
3	625,07	3.088.747	1.982.646
4	877,15	6.778.920	2.137.390

*Nota: Resultados obtenidos, numero de ejes equivalentes soportados según metodología AASHTO y corroborado por método racional tramo homogéneo no. 1. Elaboración propia 2017.*

Tabla 21.

### Comparativa Porcentual ejes equivalente Tramo 1

Correlaciones	Módulo resiliente	Nro. Ejes equivalentes	Nro. Ejes equivalentes
	Kg/cm <sup>2</sup>	Aashto	Racional
1-2'	30%	85%	6%
1-3'	-14%	-76%	-4%
1-4'	20%	53%	4%

*Nota: comparativa porcentual de numero de ejes equivalentes soportados según metodología AASHTO y método racional tramo homogéneo no. 1. Elaboración propia 2017.*

Tabla 22.

### Comparativo Porcentual ejes equivalente tramo 2

Correlaciones	Módulo resiliente	Nro. Ejes equivalentes	Nro. Ejes equivalentes
	Kg/cm <sup>2</sup>	Aashto	Racional
1-2'	27%	75%	5%
1-3'	-15%	-31%	-3%
1-4'	20%	53%	4%

*Nota: comparativa porcentual de numero de ejes equivalentes soportados según metodología AASHTO y método racional tramo homogéneo no. 2. Elaboración propia 2017.*



Tabla 23.

Comparativa Porcentual ejes equivalente Tramo 3

Correlaciones	Módulo resiliente Kg/cm <sup>2</sup>	Nro. Ejes equivalentes Aashto	Nro. Ejes equivalentes Racional
1-2'	30%	82%	6%
1-3'	-14%	-30%	-4%
1-4'	20%	53%	4%

*Nota: comparativa porcentual de numero de ejes equivalentes soportados según metodología AASHTO y método racional tramo homogéneo no. 3. Elaboración propia 2017.*

### 11.6.3. Análisis del ejemplo practico

A través del diseño de pavimento flexible por el método AASHTO se obtuvieron los espesores de la estructura del ejemplo real, que según esta metodología cumplía con los parámetros de diseño. Al tratarse el ejemplo práctico de un diseño de pavimentos real, el cual tuvo que ser comprobado a través de la ley de fatiga del instituto de asfalto, se debe determinar la capacidad estructural del pavimento por medio de las deformaciones generadas por el tránsito, en dos puntos claves de la estructura. Al utilizar estos espesores y chequear con los mismos las deformaciones y la capacidad según el método de comprobación, se evidencio que la estructura no cumplía, es decir, soportaría menos ejes equivalentes que los esperados según el estudio de tránsito para su periodo de vida útil. Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a replantear los espesores de manera que cumplieran con ambos criterios de diseño. Después de realizar nuevamente la comprobación del diseño, se observó que todos diseños cumplen con la misma estructura, es decir, tienen los mismos espesores de capas asfálticas y granulares

Al final, con los espesores que hicieron que la estructura cumpliera, se observó que con la metodología AASHTO aumento significativamente la capacidad estructural del pavimento, la cual varía según la correlación.

Como resultado del diseño por AASHTO 93 y comprobación por ley de fatiga, se obtuvo la siguiente estructura de pavimento:

Se pudo apreciar que capacidad estructural, resultado de la metodología AASHTO indica una mayor resistencia de las cargas impartidas por el tráfico, es decir, numero de ejes equivalentes, que aquella dispuesta por el método racional (bisar) con una diferencia de 121%, en el caso de la correlación 1, 287% para la correlación 2, 225% para la correlación 4, siendo la de menor diferencia los resultados de la correlación 3 con tan solo un 41%. En el tramo 2 se presentan diferencias menores con una diferencia de 118% en el caso de la correlación 1, 276% para la correlación 2, 219 para la correlación 4, siendo la de menor diferencia los resultados de la correlación 3 con un 57%

## **12. Conclusiones y recomendaciones**

Desde el punto de vista geotécnico se debe tener en cuenta que la geotécnica es la rama de la ingeniería la cual basa en muchas suposiciones, por tanto, es imposible conocer el comportamiento real del suelo frente a fenómenos como las cargas dinámicas a las que están expuestas las subrasantes.

Después de haber hecho los respectivos análisis, se recomienda la implementación de la correlación 1 y 3, las cuales presentaron valores menores de módulo resiliente, razón por la cual los espesores de las capas superiores que hacen parte de la estructura de pavimento serán superiores lo que aseguraría mayor capacidad estructural real.

La correlación 2 debería limitarse a utilizarse para el diseño de estructuras de pavimentos, sus autores la limitan para CBR menores de 12%, pues de utilizar valores más altos el módulo seguiría aumentando de manera tal que se alejaría aún más de la realidad, sin embargo, nuestra recomendación sería limitarla para subrasantes de suelos finos con CBR menores o iguales al 3%, en cuanto la correlación 1 se recomienda para diseños que contemplen suelos granulares que junto con las correlaciones 3 y 4 no presentan ninguna limitación, sin embargo se recomendaría utilizar la correlación 3 que al generar estructuras más grandes se estarían realizando diseños con mayor capacidad estructural real siendo un Factor de seguridad para garantizar que se cumpla el periodo de vida del pavimento.

En cuanto a la implementación de las correlaciones para la metodología de estabilización propuesta por Ivanov, no hay incidencia respecto a la utilización de la correlación, porque estabilización cuando se utilizan las correlaciones 1, 3 y 4, por lo que cualquiera de estas podría ser utilizada, limitando su implementación para CBR de

subrasantes menores del 5% que fueron los valores utilizados en esta investigación y propuestos por la AASHTO como subrasantes que requieren ser estabilizadas, además se recomienda evitar la implementación de la correlación 2 para el cálculo del módulo equivalente, debido a que el material seleccionado es un material granular de CBR aproximado del 10%, por lo que estaría fuera del límite recomendado anteriormente para esta correlación.

Después de realizar el análisis se ha podido establecer que la escogencia de la correlación no influye de manera significativa en el espesor de la capa estabilizante calculado por parte de la metodología de Ivanov.

En cuanto a los resultados del ejemplo práctico se puede concluir que, aunque los espesores sean los mismo la capacidad estructural varía en el método racional porque se tiene en cuenta el módulo resiliente para calcular las deformaciones en la carpeta asfáltica y la subrasante, las cuales no se tienen en cuenta por parte de la metodología AASHTO 93. Es importante comprobar los diseños de la metodología AASHTO 93, debido a que esta no tiene en cuenta para el diseño de estructuras de pavimento las deformaciones impartidas por tránsito a lo largo de su vida útil. Este método puede actuar como garantía de que la estructura se encuentre diseñada debidamente para el número de ejes equivalentes que el pavimento recibirá durante su vida útil.

Las diferencias de capacidad estructural entre los resultados del método racional para las cuatro correlaciones son mínimas como consecuencia al no superar una diferencia del 6%, es decir, el módulo resiliente no tuvo gran impacto en el diseño por método racional, como si lo tuvo en el método AASHTO 93, esto es debido a la interpretación de la distribución de esfuerzos en la estructura de pavimento, donde se le da muy poca

responsabilidad estructural a la subrasante y en su lugar, se le otorga una mayor responsabilidad la Carpeta asfáltica junto a las capas de Base y subbase granular.

### **13. Bibliografía.**

American Association of State Highway and Transportation Officials [1993]. Design of Pavement Structures Volume 1. United States.

Brockenbrough. R. y Kenneth, B. Jr [2004]. Highway Engineering Handbook. McGraw-Hill, second edition.

Henríquez A. Wilfredo [2006] Incidencia de parámetros de diseño de la guía AASHTO 1993, en los espesores de las capas que conforman la estructura de pavimentos flexibles y rígidos. Trabajo de graduación presentado para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.

Yang H. Huang [1993].

Pavement Analysis and Design. Edit. Prentice Hall. New Jersey, United States.

Transportation Research Board [2007] Pavement Lessons Learned from the AASHO Road Test and Performance of the Interstate Highway System. Transportation Research Circular, EC-118, p. 38-39.

AASHTO guide for desing of pavement structures, AASHTO 1993

Ingeniería de pavimentos para carreteras, segunda edición, Ing. Alfonso Montejo, 2002

Pavimentos: Materiales, construcción y diseño, Ing. Hugo Rondón e Ing. Fredy Reyes, 2015

“Determinación del módulo resiliente de diseño de pavimentos mediante criterios AASHTO 1993 Y 2002”, Herrera Montealegre, M. (2014). Universidad de Piura – Perú

Módulo resiliente de suelos finogranulares. Vidal, J., & Osorio, R. (2012). Revista Universidad EAFIT.

Influencia de la rigidez de la subrasante y las capas granulares sobre la vida a la fatiga de mezclas asfálticas. (2013). Artículo de investigación. Universidad distrital de caldas.  
Comportamiento resiliente de materiales granulares en pavimentos flexibles. (2007). Revista. Universidad de Medellín.

## **ANEXOS**





## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 1

#### System 1: Correlacion 1 tramo 1

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		7,390E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,072E-01	5,106E-01	-1,275E-01	1,884E+02	2,846E+02	-3,095E+02	-1,835E+01	0,000E+00	4,911E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-4,366E-03	-1,379E-03	-3,478E-02	1,611E+02	2,197E+02	-4,356E+02	-2,872E+01	0,000E+00	3,649E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,637E-01	4,256E-01	-1,008E-01	3,449E+01	2,783E+02	-2,118E+02	0,000E+00	0,000E+00	5,051E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-3,857E-03	-1,367E-03	-3,770E-02	1,857E+02	2,345E+02	-4,783E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,793E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 1

#### System 2: Correlacion 1 tramo 2

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		7,070E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,092E-01	5,127E-01	-1,271E-01	1,891E+02	2,855E+02	-3,102E+02	-1,848E+01	0,000E+00	5,039E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-4,204E-03	-1,285E-03	-3,413E-02	1,660E+02	2,258E+02	-4,479E+02	-2,957E+01	0,000E+00	3,775E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,658E-01	4,278E-01	-1,003E-01	3,531E+01	2,792E+02	-2,125E+02	0,000E+00	0,000E+00	5,181E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-3,693E-03	-1,263E-03	-3,698E-02	1,911E+02	2,410E+02	-4,914E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,922E+02



## BISR 3.0 - Block Report

### Correlacion 1

#### System 3: Correlacion 1 tramo 3

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		7,310E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,077E-01	5,111E-01	-1,274E-01	1,886E+02	2,848E+02	-3,096E+02	-1,838E+01	0,000E+00	4,942E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-4,326E-03	-1,355E-03	-3,462E-02	1,623E+02	2,212E+02	-4,386E+02	-2,892E+01	0,000E+00	3,680E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,642E-01	4,262E-01	-1,007E-01	3,469E+01	2,786E+02	-2,119E+02	0,000E+00	0,000E+00	5,082E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-3,816E-03	-1,340E-03	-3,752E-02	1,870E+02	2,361E+02	-4,815E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,824E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 2

#### System 1: Correlacion 2 tramo 1

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		9,640E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	3,963E-01	4,989E-01	-1,297E-01	1,842E+02	2,797E+02	-3,056E+02	-1,763E+01	0,000E+00	4,225E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-5,508E-03	-2,111E-03	-3,871E-02	1,334E+02	1,845E+02	-3,660E+02	-2,388E+01	0,000E+00	2,972E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,517E-01	4,131E-01	-1,034E-01	2,983E+01	2,733E+02	-2,076E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,349E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-5,025E-03	-2,179E-03	-4,212E-02	1,546E+02	1,974E+02	-4,033E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,098E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 2

#### System 2: Correlacion 2 tramo 2

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		9,000E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	3,991E-01	5,018E-01	-1,291E-01	1,852E+02	2,809E+02	-3,065E+02	-1,781E+01	0,000E+00	4,389E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-5,185E-03	-1,893E-03	-3,769E-02	1,403E+02	1,933E+02	-3,834E+02	-2,508E+01	0,000E+00	3,135E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,547E-01	4,163E-01	-1,027E-01	3,100E+01	2,745E+02	-2,086E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,518E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-4,692E-03	-1,938E-03	-4,096E-02	1,624E+02	2,067E+02	-4,220E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,266E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 2

#### System 3: Correlacion 2 tramo 3

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		9,470E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	3,970E-01	4,997E-01	-1,296E-01	1,845E+02	2,800E+02	-3,058E+02	-1,767E+01	0,000E+00	4,267E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-5,423E-03	-2,053E-03	-3,845E-02	1,352E+02	1,868E+02	-3,705E+02	-2,419E+01	0,000E+00	3,013E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,525E-01	4,139E-01	-1,032E-01	3,013E+01	2,736E+02	-2,079E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,392E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-4,937E-03	-2,115E-03	-4,182E-02	1,566E+02	1,998E+02	-4,081E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,141E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 3

#### System 1: Correlacion 3 tramo 1

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		6,330E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,140E-01	5,179E-01	-1,262E-01	1,910E+02	2,877E+02	-3,119E+02	-1,880E+01	0,000E+00	5,376E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-3,833E-03	-1,083E-03	-3,254E-02	1,785E+02	2,415E+02	-4,792E+02	-3,175E+01	0,000E+00	4,106E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,711E-01	4,333E-01	-9,928E-02	3,740E+01	2,815E+02	-2,144E+02	0,000E+00	0,000E+00	5,525E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-3,323E-03	-1,038E-03	-3,520E-02	2,051E+02	2,574E+02	-5,250E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,260E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 3

#### System 2: Correlacion 3 tramo 2

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		6,030E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,162E-01	5,202E-01	-1,257E-01	1,918E+02	2,886E+02	-3,127E+02	-1,895E+01	0,000E+00	5,532E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-3,684E-03	-1,008E-03	-3,185E-02	1,841E+02	2,485E+02	-4,932E+02	-3,272E+01	0,000E+00	4,259E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,735E-01	4,358E-01	-9,883E-02	3,834E+01	2,825E+02	-2,152E+02	0,000E+00	0,000E+00	5,685E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-3,176E-03	-9,550E-04	-3,443E-02	2,114E+02	2,648E+02	-5,401E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,417E+02





## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 3

#### System 3: Correlacion 3 tramo 3

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		6,250E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,146E-01	5,185E-01	-1,260E-01	1,912E+02	2,879E+02	-3,122E+02	-1,884E+01	0,000E+00	5,416E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-3,793E-03	-1,062E-03	-3,236E-02	1,800E+02	2,433E+02	-4,828E+02	-3,200E+01	0,000E+00	4,145E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,718E-01	4,340E-01	-9,916E-02	3,765E+01	2,818E+02	-2,146E+02	0,000E+00	0,000E+00	5,566E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-3,284E-03	-1,015E-03	-3,499E-02	2,067E+02	2,593E+02	-5,289E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,301E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 4

#### System 1: Correlacion 4 tramo 1

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		8,870E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	3,996E-01	5,025E-01	-1,290E-01	1,855E+02	2,812E+02	-3,067E+02	-1,785E+01	0,000E+00	4,425E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-5,119E-03	-1,850E-03	-3,747E-02	1,418E+02	1,952E+02	-3,871E+02	-2,534E+01	0,000E+00	3,170E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,553E-01	4,170E-01	-1,025E-01	3,125E+01	2,748E+02	-2,089E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,555E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-4,624E-03	-1,890E-03	-4,072E-02	1,640E+02	2,087E+02	-4,260E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,302E+02



## BISR 3.0 - Block Report

### Correlacion 4

#### System 2: Correlacion 4 tramo 2

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		8,490E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,014E-01	5,044E-01	-1,286E-01	1,861E+02	2,820E+02	-3,074E+02	-1,796E+01	0,000E+00	4,536E+02
2	4	0,000E+00	0,000E+00	4,301E-01	-4,926E-03	-1,724E-03	-3,682E-02	1,463E+02	2,010E+02	-3,984E+02	-2,613E+01	0,000E+00	3,280E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,573E-01	4,190E-01	-1,021E-01	3,201E+01	2,756E+02	-2,095E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,668E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-4,426E-03	-1,750E-03	-3,999E-02	1,691E+02	2,148E+02	-4,383E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,415E+02



## BISAR 3.0 - Block Report

### Correlacion 4

#### System 3: Correlacion 4 tramo 3

#### Structure

#### Loads

Layer Number	Thickness (m)	Modulus of Elasticity (MPa)	Poisson's Ratio	Load Number	Vertical Load (kN)	Vertical Stress (MPa)	Horizontal (Shear) Load (kN)	Horizontal (Shear) Stress (MPa)	Radius (m)	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Shear Angle (Degrees)
1	0,150	1,450E+03	0,35	1	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	0,000E+00	0,000E+00	0,000E+00
2	0,160	1,960E+02	0,35	2	2,000E+01	5,488E-01	0,000E+00	0,000E+00	1,077E-01	3,230E-01	0,000E+00	0,000E+00
3	0,120	1,170E+02	0,40									
4		8,770E+01	0,45									

Position Number	Layer Number	X-Coord (m)	Y-Coord (m)	Depth (m)	XX (MPa)	Stresses YY (MPa)	ZZ (MPa)	XX $\mu$ strain	Strains YY $\mu$ strain	ZZ $\mu$ strain	UX ( $\mu$ m)	Displacements UY ( $\mu$ m)	UZ ( $\mu$ m)
1	1	0,000E+00	0,000E+00	1,499E-01	4,001E-01	5,030E-01	-1,289E-01	1,856E+02	2,814E+02	-3,069E+02	-1,788E+01	0,000E+00	4,454E+02
2	3	0,000E+00	0,000E+00	3,401E-01	3,099E-04	6,061E-03	-4,877E-02	1,487E+02	2,175E+02	-4,386E+02	-2,598E+01	0,000E+00	3,559E+02
3	1	1,615E-01	0,000E+00	1,499E-01	1,559E-01	4,175E-01	-1,024E-01	3,144E+01	2,750E+02	-2,090E+02	0,000E+00	0,000E+00	4,584E+02
4	4	1,615E-01	0,000E+00	4,301E-01	-4,572E-03	-1,853E-03	-4,053E-02	1,653E+02	2,103E+02	-4,292E+02	0,000E+00	0,000E+00	3,331E+02